第四版序言

在本书第一版写完以来的三十五年间，近世代数已成为世界上大学的标准课程，并且已有许多用于这门课程的著作. 尽管如此，回顾一下我们的基本指导思想——也是现在这本书的基本指导思想——看来是可取的.

“我们始终力求表达各种常用的定义的构思背景. 为此，我们尽可能用较多的熟悉的例子说明每个新术语. 这在基础教科书里特别重要，因为它可以说明一切抽象概念都来源于对具体情况的分析.

“为了提高学生按照新概念独立思考的能力，每个课题里我们都编入广泛多样的习题. 这些习题中，一些用来计算，一些用来进一步寻找新概念的例子，另一些给出附加的理论推导. 后一种类型的习题对于学生熟悉正式证明的结构有重要的作用. 习题的选择足够使讲授者改编课本，以适应在校大学生和研究生一年级学生不同程度的需要.

“近世代数也能够重新解释古典代数的结果，使它们具有更大的统一性和一般性. 因此，我们并不省略这些结果，而努力把它们系统地编入近世代数的范围内.

“我们还力求不忽略如下事实：对于许多学生来说，代数学的意义在于它在其他领域的应用，这些领域如高等分析、几何学、物理学和哲学等等. 这使我们强调实数域和复数域、同抽象群相对照的变换群、对称矩阵及其对角化、正交群下和欧几里得群下的二

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

次型分类，并使我们最后加上布尔代数、格论和超限数的内容. 所有这些内容在数理逻辑和实函数近代理论中都很重要."

详细地说，我们的第一、二、三章介绍交换环中线性方程和多项式方程理论，在强调普通的整数环、有理数域的同时，还强调了模 n 整数环和相伴多项式环. 第四、五章叙述实数域和复数域的基本代数性质，这对于几何学和物理学具有头等重要性.

第六章通过群这个最简单最基本的概念，引进非交换代数. 在第七至十章里，群的概念系统地用到矢量空间和矩阵上. 这里注意，代数学在欧几里得几何、仿射几何和射影几何中一直起着最显著最基础的作用. 还讨论了对偶空间和张量积，但不考虑推广到环上加法群.

第十一章包含布尔代数和格论十分简单的介绍，后面第十二章，有关于超限数的简短讨论. 最后的三章介绍了一般交换代数和算术：理想和商环、域的扩张、代数数及其因子分解以及伽罗瓦理论.

许多章是相互独立的. 例如，群论一章可以紧接第一章之后介绍，而关于理想和域的内容（§13.1 和 §14.1）可以直接在矢量空间后来研究.

这种独立性是为了使这本书既适用于只具备中学代数知识的学生的全年教程，又适用于各式各样的短期教程. 例如包括线性代数的一学期或一学季的课程，可以以第六至十章为基础，实数域和复数域是要强调的. 关于抽象代数的一学期课程，可以安排第一、二、三、六、七、八、十一、十三、十四章，还可以做其他安排.

我们希望本书不仅继续作为课本，而且为那些想要把近世代数的基本概念用于数学的其他领域（包括统计学和计算），用于物理学、化学和工程技术的读者作为方便的参考书.

在此愉快地向 C. 贝尔，A. A. 波恩涅，E. 阿廷，F. A. 菲肯，J.

S. 弗雷姆, N. 雅各布森, W. 莱顿, G. 梅里曼, D. D. 米勒, I. 尼文以及许多其他朋友和同事致谢，他们提供了有益的建议和改进. 另外还要感谢 S. 麦克莱恩夫人，前三版中她作了秘书工作.

Cambridge, Mass. G. 伯克霍夫
Chicago, Illinois S. 麦克莱恩

目　录

第一章　整数……1

§1.1　交换环·整环……1
§1.2　交换环的基本性质……3
§1.3　有序整环的性质……9
§1.4　良序原则……12
§1.5　数学归纳法·指数定律……14
§1.6　可除性……18
§1.7　欧几里得算法……19
§1.8　算术基本定理……25
§1.9　同余式……27
§1.10　环 Z_n……32
§1.11　集合·函数·关系……35
§1.12　同构与自同构……39

第二章　有理数和域……42

§2.1　域的定义……42
§2.2　有理数域的构造……47
§2.3　联立线性方程……53
§2.4　有序域……58
*§2.5　正整数公设……61
*§2.6　皮亚诺公设……65

第三章　多项式……69

§3.1　多项式形式……69
§3.2　多项式函数……73
§3.3　交换环的同态……78
*§3.4　多元多项式……81

§3.5 辗转相除法……84
§3.6 单位与相伴……86
§3.7 不可约多项式……90
§3.8 唯一因子分解定理……92
*§3.9 其他唯一因子分解整环……97
*§3.10 爱森斯坦不可约判别准则……102
*§3.11 部分分式……104

第四章 实数……110

§4.1 毕达哥拉斯二难推论……110
§4.2 上界与下界……112
§4.3 实数公设……115
§4.4 多项式方程的根……118
*§4.5 戴德金分割……122

第五章 复数……127

§5.1 复数的定义……127
§5.2 复平面……130
§5.3 代数基本定理……134
§5.4 共轭数与实多项式……138
*§5.5 二次方程与三次方程……140
*§5.6 四次方程的根式解法……143
*§5.7 稳定型方程……145

第六章 群……147

§6.1 正方形的对称……147
§6.2 变换群……149
§6.3 其他例子……155
§6.4 抽象群……157
§6.5 同构……162
§6.6 循环群……165
§6.7 子群……169
§6.8 拉格朗日定理……173
§6.9 置换群……176

§6.10 偶置换与奇置换 ……181
§6.11 同态 ……183
§6.12 自同构 · 共轭元素 ……186
*§6.13 商群 ……190
*§6.14 等价关系与同余关系 ……193

第七章 矢量与矢量空间 ……198

§7.1 平面矢量 ……198
§7.2 推广 ……199
§7.3 矢量空间与子空间 ……202
§7.4 线性无关与维数 ……207
§7.5 矩阵与行等价 ……212
§7.6 线性相关的检验 ……215
§7.7 矢量方程 · 齐次方程 ……221
§7.8 基底与坐标系 ……226
§7.9 内积 ……233
§7.10 欧几里得矢量空间 ……235
§7.11 标准正交基 ……238
§7.12 商空间 ……242
*§7.13 线性函数与对偶空间 ……244

第八章 矩阵代数 ……251

§8.1 线性变换与矩阵 ……251
§8.2 矩阵加法 ……258
§8.3 矩阵乘法 ……260
§8.4 对角矩阵·置换矩阵·三角形矩阵 ……266
§8.5 长方矩阵 ……269
§8.6 逆矩阵 ……275
§8.7 秩与零度 ……281
§8.8 初等矩阵 ……284
§8.9 等价与标准型 ……290
*§8.10 双线性函数与张量积 ……293
*§8.11 四元数 ……298

数学符号表 ………………………………………………………………………………303
索引 ……………………………………………………………………………………305

第一章　整　　数

§1.1　交换环·整环

近世代数第一次揭示了数学系统的多变性和丰富性. 我们将构造并研究许多这样的系统，但是它们中最基本的是最古老的数学系统——由所有正整数(全体)组成的系统. 与其有关的，稍大一点的系统是由所有整数 $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \cdots$ 组成的集合 $\mathbf{Z}$. 因为它与近世代数中的其他系统极为相似，所以我们的讨论就从它开始.

整数具有许多有趣的代数性质. 在这一章里，我们将假定一些象公设那样特别明显的性质，并通过逻辑推理由它们导出许多别的性质.

我们首先假定加法和乘法的八个公设. 这些公设不仅对于整数成立，而且对于许多其他数系都成立，例如所有有理数(分数)、所有实数(无限小数)和所有复数. 这些公设对于多项式和任意已知区间上的连续实函数也成立. 对于系统 R，当这八个公设成立时，我们称 R 为交换环.

定义　设 R 是由元素 $a, b, c, \cdots$ 组成的集合，在 R 上定义了任意两个元素 a 与 b (不同或相同) 的和 $a+b$ 及积 ab. 如果下列公设(i)～(viii)成立，那么 R 称为交换环:

(i)　封闭性. 若 a 与 b 在 R 中，则和 $a+b$ 及积 ab 在 R 中.

(ii)　唯一性. 若 R 中 $a=a'$ 且 $b=b'$，则

$$a+b=a'+b' \text{ 以及 } ab=a'b'.$$

(iii)　交换律. 对 R 中一切 a 与 b，

$$a+b=b+a, \qquad ab=ba.$$

(iv) 结合律. 对 R 中一切 a, b, c,

$$a+(b+c)=(a+b)+c,$$
$$a(bc)=(ab)c.$$

(v) 分配律. 对 R 中一切 a, b, c,

$$a(b+c)=ab+ac.$$

(vi) 零. R 包含元素 0, 使得

$$a+0=a, \quad 对 R 中一切 a 成立.$$

(vii) 单位元素. R 包含元素 $1\neq 0$, 使得

$$a1=a, \quad 对 R 中一切 a 成立.$$

(viii) 加法逆元素. 对 R 中每个 a, 方程

$$a+x=0 \quad 在 R 中有解 x.$$

所有整数的集合 $\mathbf{Z}$ 满足这些公设,这是我们熟知的. 例如,交换律和结合律是这么熟悉,以致在平常应用时无须明确提及它们,就把 $a+b+c$ 表示相等的数 $a+(b+c)$ 和 $(a+b)+c$. (vi) 中指出的 0 的性质是数零的特性;类似地,(vii) 中指出的 1 的性质是数 1 的特性. 因为这两个公设形式上是类似的,所以我们可以说,0 和 1 分别是加法和乘法的"单位元素". (vii) 中的假定 $1\neq 0$ 排除了平凡的情形(否则,交换环将是仅由整数 0 所组成的集合).

所有整数的系统 $\mathbf{Z}$ 具有另一个不能由上述公设推出的性质,即若 $\mathbf{Z}$ 中 $c\neq 0$ 且 $ca=cb$, 则必有 $a=b$ ((ii) 中后一部分的逆性质). 但是交换环不一定都具有这个性质,例如由已知区间上的全体实函数组成的集合,虽然它们构成交换环,但并不满足上述性质. 因此,全体整数不仅构成交换环,而且构成按下述意义定义的整环.

定义 满足下面附加公设的交换环是整环:

(ix) 消去律. 若 $c\neq 0$, 且 $ca=cb$, 则 $a=b$.

整环 $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$. 由所有形为 $a+b\sqrt{2}$ 的数组成的整环是数论

所感兴趣的，这里 a 和 b 是普通整数(在 $\mathbf{Z}$ 中)．在 $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$ 中，$a+b\sqrt{2}=c+d\sqrt{2}$ 当且仅当 $a=c$，$b=d$．加法和乘法分别定义为

$$(a+b\sqrt{2})+(c+d\sqrt{2})=(a+c)+(b+d)\sqrt{2},$$

$$(a+b\sqrt{2})(c+d\sqrt{2})=(ac+2bd)+(ad+bc)\sqrt{2}.$$

对于这些运算，唯一性和交换律是容易验证的，而 $0+0\sqrt{2}$ 相当于零，并且 $1+0\sqrt{2}$ 相当于单位元素．$a+b\sqrt{2}$ 的加法逆元素是 $(-a)+(-b)\sqrt{2}$．结合律和分配律的验证稍长一些，消去律的验证将放到 §1.2 末尾．

§1.2 交换环的基本性质

在初等代数中，人们常常认为上述公设及其基本推论是允许的．倘若对照特殊的例子检验代数运算时，一般不会发生大的错误．然而，当我们想要得到对于整个代数系统都正确的结论(例如，一般地，对一切整环都成立)时，必须多加小心．我们必须确信，所有证明只用到明显列出的公设和一般逻辑法则，其中最基本的逻辑法则是相等关系的三个基本定律：

自反律　$a=a$．

对称律　若 $a=b$，则 $b=a$．

传递律　若 $a=b$ 且 $b=c$，则 $a=c$，

对一切 a, b 和 c 都成立．

现在我们列出几个在任意交换环 R 中都成立的法则，并给出它们正式的证明．

法则 1　对 R 中一切 a, b, c，有

$$(a+b)c=ac+bc.$$

这法则可称为*右分配律*．与公设 (v) 对比，公设 (v) 是左分配律．

证明 对 R 中一切 a, b, c, 有

1° $(a+b)c=c(a+b)$ (乘法交换律)

2° $c(a+b)=ca+cb$ (分配律)

3° $(a+b)c=ca+cb$ (1°, 2°, 传递律)

4° $ca=ac, cb=bc$ (乘法交换律)

5° $ca+cb=ac+bc$ (4°, 加法唯一性)

6° $(a+b)c=ac+bc$ (3°, 5°, 传递律)

法则 2 对 R 中一切 a, $0+a=a$, 且 $1a=a$.

证明 对 R 中一切 a, 有

1° $0+a=a+0$ (加法交换律)

2° $a+0=a$ (零的性质)

3° $0+a=a$ (1°, 2°, 传递律)

$1a=a$ 的证明类似.

法则 3 如果 R 中的 z 具有性质“对 R 中一切 a, $a+z=a$”, 那么 $z=0$.

这个法则表明, R 仅包含一个 0 元素, 它可以起加法单位元素的作用.

证明 因为 $a+z=a$ 对一切 a 都成立, 所以当 a 为 0 时等式也成立.

1° $0+z=0$

2° $0=0+z$ (1°, 对称律)

3° $0+z=z$ (法则 2, 当 a 为 z)

4° $0=z$ (2°, 3°, 传递律)

在以后的这类证明中, 相等的对称律和传递律的反复运用, 我们都不必写出.

法则 4 对 R 中一切 a, b, c 成立:

由 $a+b=a+c$, 可推出 $b=c$.

这个法则称为加法消去律.

证明 根据公设(viii),对元素a, 存在元素x,使 $a+x=0$. 因此

1° $x+a=a+x=0$ (加法交换律,传递律)

2° $x=x, a+b=a+c$ (自反律,假设)

3° $x+(a+b)=x+(a+c)$ (2°,加法唯一性)

4° $b=0+b=(x+a)+b$

$=x+(a+b)=x+(a+c)$

$=(x+a)+c=0+c=c$

(补上4°中每步的理由!)

法则 5 对每个a,R包含方程$a+x=0$的唯一解x.

这个解通常用$x=-a$表示. 因此这法则可被引述为$a+(-a)=0$. 通常,符号$a-b$表示$a+(-b)$.

证明 根据公设(viii),存在解x. 如果y是第二个解,那么根据传递律和对称律,$a+x=0=a+y$. 因此由法则4,$x=y$. 证毕

法则 6 对R中给定的a和b,在R中存在唯一的x, 使$a+x=b$.

这个法则表明,减法是可能的而且差是唯一的.

证明 取$x=(-a)+b$. 则(给出理由!)

$$a+x=a+[(-a)+b]=[a+(-a)]+b=0+b=b.$$

如果y是第二个解,那么根据传递律$a+x=b=a+y$, 因此由法则4,$x=y$. 证毕

法则 7 对R中一切a, $a\cdot 0=0=0\cdot a$.

证明

1° $a=a, a+0=a$ (自反律,公设(vi))

2° $a(a+0)=aa$ (1°,乘法唯一性)

3° $aa+a\cdot 0=a(a+0)=aa$ (分配律等)

$=aa+0$

4° $a\cdot 0=0$ (3°, 法则 4)

5° $0\cdot a=a\cdot 0=0$ (乘法交换律, 4°)

法则 8 如果R中的u具有性质"对R中一切a, $au=a$", 那么$u=1$.

这个法则表明乘法单位元素 1 的唯一性. 证明类似于法则 3, 留作习题.

法则 9 对R中一切a和b, $(-a)(-b)=ab$.

这个法则的特殊情形是"玄"律$(-1)(-1)=1$.

证明 考察三重和(结合律!)

1° $[ab+a(-b)]+(-a)(-b)=ab+[a(-b)+(-a)(-b)]$.

由分配律, $-a$的定义, 法则 7 和公设(vi)得

2° $ab+[a(-b)+(-a)(-b)]=ab+[a+(-a)](-b)$

$$=ab+0(-b)=ab.$$

同理, 有

3° $[ab+a(-b)]+(-a)(-b)=a[b+(-b)]+(-a)(-b)$

$$=a\cdot 0+(-a)(-b)=(-a)(-b).$$

因此, 根据相等的传递律和对称律, 从 1°, 2°和 3°得出结论.

其他各种简单而熟悉的法则, 都是我们公设的推论, 其中一些在下面习题中叙述.

另一个基本的代数定律是用在解二次方程. 比如, 由$(x+2)(x-3)=0$推出或者$x+2=0$或者$x-3=0$, 就用到这个定律, 它的一般形式就是断语:

$$\text{若 } ab=0, \text{则或者 } a=0 \text{ 或者 } b=0. \tag{1}$$

这个断语不是对一切交换环都成立的. 但是在任意整环D中, 根据消去律, 这个断语是正确的. 因为假设第一个因子不为零, 则$ab=0=a0$, 并且a可以消去, 因此$b=0$. 反之, 在任意交换环R

中，从断语(1)可得到消去律. 因为如果 $a\neq0, ab=ac$，则有 $ab-ac=a(b-c)=0$，由(1)得 $b-c=0$. 因此，我们有

定理1 *在交换环中，乘法消去律等价于"非零因子之积不为零"这个命题.*

使乘积 $ab=0$ 的非零元素 a 和 b 有时称为"零因子"，因此，交换环 R 中的消去律等价于"R 不包含零因子".

定理 1 可以用来证明 § 1.1 末尾定义的整环 $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$ 的消去律，如下所述. 假定 $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$ 包含零因子，使

$$(a+b\sqrt{2})(c+d\sqrt{2})=(ac+2bd)+(ad+bc)\sqrt{2}=0.$$

由定义可推出 $ac+2bd=0, ad+bc=0$. 用 d 乘第一个等式，用 c 乘第二个等式，而后相减，得到 $b(2d^2-c^2)=0$，所以或者 $b=0$，或者 $c^2=2d^2$. 如果 $b=0$，则上述两个方程给出 $ac=ad=0$，因此，根据定理 1，不是 $a=0$ 就是 $c=d=0$. 但是第一种情形 $a=0$ 意味着 $a+b\sqrt{2}=0$(因为 $b=0$)；第二种情形意味着 $c+d\sqrt{2}=0$，所以这两种情形中，都没有零因子.

现在余下 $c^2=2d^2$ 的情形，这意味着 $\sqrt{2}=\dfrac{c}{d}$ 是有理数，这是不可能的，在 § 3.7 定理 10 中将给出它的证明.

如果承认 $\sqrt{2}$ 是实数，而且承认所有实数的集合构成整环，那么借助于下面子整环的概念可以非常容易地证明 $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$ 是整环.

定义 *整环 D 的子整环是 D 的子集，它对于同一种加法和乘法运算也是整环.*

显然，子集 S 是子整环的充分必要条件是：S 包含 0 和 1；S 包含其中任意元素 a 的加法逆元素；S 包含其中任意两个元素 a 与 b 的和 $a+b$ 及积 ab.

习　题

对 1～5 中的每个习题给出完整的证明. 在证每一步时可用公设, 前一步的结果, 正文中已建立的法则, 或者已经作过的练习.

1. 证明下列法则在任意整环中都成立:

   (a) $(a+b)(c+d)=(ac+bc)+(ad+bd)$,

   (b) $a+[b+(c+d)]=(a+b)+(c+d)=[(a+b)+c]+d$,

   (c) $a+(b+c)=(c+a)+b$,

   (d) $a(bc)=c(ab)$,

   (e) $a[b+(c+d)]=(ab+ac)+ad$,

   (f) $a(b+c)d=(ab)d+a(cd)$.

2. (a) 证明法则 8.

   (b) 证明 $1\cdot 1=1$.

   (c) 证明整环中仅有的幂等元素(即满足 $xx=x$ 的元素 x)是 0 和 1.

3. 证明下列法则对任意整环中的 $-a$ 都成立:

   (a) $-(-a)=a$,

   (b) $-0=0$,

   (c) $-(a+b)=(-a)+(-b)$,

   (d) $-a=(-1)a$,

   (e) $(-a)b=a(-b)=-(ab)$.

4. 由习题 3(d) 和特殊情形 $(-1)(-1)=1$ 证明法则 9.

5. 证明在任意整环中下列法则对于运算 $a-b=a+(-b)$ 都成立:

   (a) $(a-b)+(c-d)=(a+c)-(b+d)$,

   (b) $(a-b)-(c-d)=(a+d)-(b+c)$,

   (c) $(a-b)(c-d)=(ac+bd)-(ad+bc)$,

   (d) $a-b=c-d$ 当且仅当 $a+d=b+c$,

   (e) $(a-b)c=ac-bc$.

6. 下列实数的集合是整环吗? 为什么?

   (a) 所有偶数.

   (b) 所有奇数.

   (c) 所有正整数.

   (d) 所有实数 $a+b\sqrt[4]{5}$, 这里 a 和 b 为整数.

(e) 所有实数 $a+b\sqrt[4]{9}$，这里 a 和 b 为整数.

(f) 所有分母为 2 的幂或 1 的有理数.

7. (a) 证明：仅由 0 和 1 组成的系统在通常的加法和乘法（$1+1=0$（而不是 2）除外）运算之下是一个整环.

(b) 证明：在仅由 0 组成的系统中定义 $0+0=0\cdot 0=0$，则除了 (vii) 中的条件 $0\neq 1$ 外，它满足整环的所有公设.

8. (a) 证明：如果代数系统 S 满足整环的一切公设，(vii) 中的条件 $0\neq 1$ 可能除外，那么，S 或者是整环，或者是仅由 0 组成的系统（如习题 7(b) 中所描述的）.

(b) 在法则 1～9 的证明中用到条件 $0\neq 1$ 吗？

9. 假定按通常定义任意两个整数的和，而任意两个整数的积定义为零. 在这两种运算之下，整环的公设中哪一些还仍然满足？

10. 找出两个函数 $f\not\equiv 0$ 和 $g\not\equiv 0$ 满足 $fg\equiv 0$.

§1.3 有序整环的性质

因为所有普通整数的环 $\mathbf{Z}$ 在数学中起着独特的作用，因此我们将研究它的特殊性质，乘法交换律和消去律仅仅是其中两个. 许多其他性质都来源于整数有可能被排成通常的次序

$$\cdots -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, \cdots$$

这个次序常用关系 $a<b$ 来表达，这里断语“$a<b$”（a 小于 b）意味着，在上面所排的次序中，整数 a 位于整数 b 的左边. 关系 $a<b$ 成立当且仅当差 $b-a$ 为正整数，从而关系 $a<b$ 的每个性质可由正整数集合的性质导出. 因此我们假设正整数 1, 2, 3, …集合的下列三个性质作为公设.

加法律 两个正整数的和是正整数.

乘法律 两个正整数的积是正整数.

三分律 对于已知整数 a，下面三种情况中有一个且仅有一个成立：或者 a 为正整数，或者 $a=0$，或者 $-a$ 为正整数.

顺便说一下，在这些性质以及它们的推论中，把“正整数”换成

1108801

"正有理数"或"正实数"仍然成立. 为方便起见，把包含具有这些性质的正元素的整环称为有序整环.

定义 如果整环D中存在某些被称为正元素的元素，它们满足类似于上面对整数指出的加法、乘法和三分律三个公设，那么称D为有序整环.

定理2 在任意有序整环中，一切非零元素的平方都是正的.

证明 设a^2已知，$a\neq 0$. 根据三分律，或者a是正的，或者$-a$是正的. 在第一种情形中，由正元素的乘法律知，a^2是正的；在第二种情形中，$-a$是正的，因此根据§1.2的法则9，$a^2=(-a)^2>0$.

证毕

由此推出$1=1^2$总是正的.

定义 在有序整环中，$a<b$(读作"a小于b")和$b>a$("b大于a")这两个等价的说法都意味着$b-a$是正的. 还有，$a\leqslant b$的意思是$a<b$或者$a=b$.

根据这个定义，正元素a现在可以描述为大于零的元素a. 元素$b<0$称为负元素. 从上面的定义，我们能推出关系"小于"的几个熟悉的性质.

传递律 若$a<b$且$b<c$，则$a<c$.

证明 根据定义，由假设$a<b$和$b<c$可推出$b-a$和$c-b$是正的. 因此由加法律，其和$(b-a)+(c-b)=c-a$是正的，这意味着$a<c$.

正元素的三个基本公设对应着不等式的三个相应的性质.

不等式两边同时加上一元素 若$a<b$，则$a+c<b+c$.

不等式两边同时乘以一正元素 若$a<b$且$c>0$，则$ac<bc$.

三分律 对任意a和b，三个关系式$a<b$，$a=b$和$a>b$中有一个且仅有一个成立.

作为例子，我们证明第二个性质，即一个不等式两边乘以正元

素 c，不等式仍然成立．这结论要求我们证明 $bc-ac=(b-a)c$ (参看 § 1.2 的习题 5(e))是正的．而这是乘法公设的直接推论，因为根据假设，因子 $b-a$ 和 c 都是正的．类似地，我们可以证明，不等式两边乘以负元素时，不等式反向(参看下面的习题 1(c))．

定义 在有序整环中，当元素 a 为 0 时，它的绝对值 $|a|$ 是0；否则 $|a|$ 是元素对 $a, -a$ 中的正元素．

这个定义可以改述为

$$|a|=a, \text{当 } a\geqslant 0; \quad |a|=-a, \text{当 } a<0. \tag{2}$$

适当地分这两种情形考虑，我们可以证明和的绝对值与积的绝对值的定律：

$$|a+b|\leqslant|a|+|b|, \quad |ab|=|a|\,|b|. \tag{3}$$

和的绝对值的定律也可以这样得到：根据定义，我们有

$$-|a|\leqslant a\leqslant|a| \text{ 且 } -|b|\leqslant b\leqslant|b|,$$

因此，不等式相加而得

$$-(|a|+|b|)\leqslant a+b\leqslant|a|+|b|.$$

这立即表明，$a+b$ 不论是正的还是负的，它的绝对值不能超过 $|a|+|b|$．

习 题

1. 从有序整环公设推导下列法则：
   (a) 若 $a<b$，则 $a+c<b+c$，反之亦真．
   (b) $a-x<a-y$ 当且仅当 $x>y$．
   (c) 若 $a<0$，则 $ax>ay$ 当且仅当 $x<y$．
   (d) 若 $c>0$ 和 $ac<bc$，则 $a<b$．
   (e) 若 $x+x+x+x=0$，则 $x=0$．
   (f) 若$a<b$，则 $a^3<b^3$．
   (g) 若 $c\geqslant 0$，则由 $a\geqslant b$ 可推出 $ac\geqslant bc$．
2. 证明：方程 $x^2+1=0$ 在有序整环中无解．

3. 尽你的可能，证明一些关于关系 $a\leqslant b$ 的定律.

4. 证明：在任意有序整环中，$||a|-|b||\leqslant|a-b|$.

*5[①]. 证明：在任意有序整环中，由 $a^7=b^7$ 可推出 $a=b$.

*6. 证明：在任意有序整环中，对一切 $a, b, a^2-ab+b^2\geqslant 0$.

*7. 在整环 $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$ 中定义正元素，并证明加法、乘法和三分律三个公设成立.

*8. 设 D 为整环，在 D 中定义了关系 $a<b$，它满足正文中指出的传递律、不等式的加法和乘法原则以及三分律. 证明：当适当地选择正元素的集合时，D 为有序整环.

*9. 详细证明：有序整环的任一子整环为有序整环.

*10. 设 R 为任意交换环，它包含一个满足加法、乘法和三分律三个公设的正元素的子集. 证明 R 是有序整环. (提示：证明乘法消去律成立. 分四种情况讨论：

$x>0$ 且 $y>0$, $x>0$ 且 $-y>0$, $-x>0$ 且 $y>0$, $-x>0$ 且 $-y>0$.)

§1.4 良序原则

如果有序整环(如实数系那样)的子集 S 的每个非空子集都包含最小元素，那么 S 称为*良序的*. 利用这个概念我们可以阐述整数的重要性质，这性质在特征上不是代数的，并且是其他数系所不具备的. 这就是

良序原则 全体正整数的集合是良序的.

换句话说，正整数的任意非空集合 C 必包含某最小元素 m，使 C 中的 c 总有 $m\leqslant c$. 例如，最小正偶数是 2.

为了说明这个原则的作用，我们证明

定理 3 *0 和 1 之间没有整数.*

看一下全体整数的自然次序，这马上就清楚了. 但是我们想要指出，不看这个次序而从我们的假设出发也可以证明这个事实.

---

① 这里和后面较难的习题都打上了 * 号.

现在我们给出这个证明. 如果存在适合 $0<c<1$ 的任意整数 c，那么所有这种整数的集合 C 是非空的. 根据良序原则，这个集合中有最小整数 m，并且 $0<m<1$. 当我们用正数 m 乘这个不等式两边时，得到 $0<m^2<m$. 于是 m^2 是集合 C 中的另一整数，它小于已假定的 C 中最小元素 m. 这个矛盾导出定理 3 成立.

定理 4 如果正整数的一个集合 S 包含 1，并且当它包含 n 时必包含 $n+1$，那么集合 S 包含任意正整数.

证明 只须证明，由那些不含于 S 的正整数组成的集合 S' 是空的. 假设 S' 不是空的，它将包含最小元素 m. 但根据假设 $m\neq1$，因此由定理 3，$m>1$，所以 $m-1$ 是正的. 但是 $1>0$，$m-1<m$，所以根据 m 的选择，$m-1$ 将在 S 中. 根据假设得到 $(m-1)+1=m$ 在 S 中. 这个矛盾使定理成立.

习　题

1. 证明：对任意整数 a，$a-1$ 是小于 a 的最大整数.

2. 下列集合中哪些是良序的：

   (a) 所有正奇数，

   (b) 所有负偶数，

   (c) 所有大于 -7 的整数，

   (d) 所有大于 249 的奇数.

3. 证明：良序集的任意子集是良序的.

4. 证明：如果整数的集合包含 -1000，并且当它包含 x 时必包含 $x+1$，那么这个集合包含所有正整数.

5. (a) 如果对整数集合 S 中的一切 x，有整数 b，使 $b\leq x$，那么 S 称为有整数 b 作为“下界”，b 本身不一定在 S 中. 证明：具有下界的任意非空整数集合 S 具有最小元素.

   (b) 证明：具有“上界”的任意非空整数集合具有最大元素.

§1.5 数学归纳法·指数定律

现在我们可以按加法、乘法及序完整地列出全体整数集合的基本性质. 今后我们假定全体整数构成有序整环 **Z**, 其中所有正元素的集合是良序的. 全体整数的集合的其他每个数学性质, 可以由此通过严格的逻辑推导来证明. 特别是, 我们能导出非常重要的

数学归纳法原理 设命题 $P(n)$ 与每个正整数 n 有关, 它或者正确或者错误. 如果(i) $P(1)$ 是正确的, (ii) 对一切 k, 由 $P(k)$ 推出 $P(k+1)$, 那么 $P(n)$ 对一切正整数 n 都是正确的.

为了从良序导出这个原理, 只要观察使 $P(k)$ 正确的那些正整数 k 的集合, 因为它满足定理 4 的假设条件, 因此由定理 4 的结论便得到这个原理.

现在用归纳的方法来证明在任意交换环中成立的各种定律. 我们首先用它来形式地建立任意 n 个被加数的一般分配律

$$a(b_1+b_2+\cdots+b_n)=ab_1+ab_2+\cdots+ab_n \tag{4}$$

为明确起见, 我们定义累加和 $b_1+\cdots+b_n$ 如下:

$$b_1+b_2+b_3=(b_1+b_2)+b_3,$$

$$b_1+b_2+b_3+b_4=[(b_1+b_2)+b_3]+b_4.$$

一般地, 可表为递推公式(对于 $k\geqslant1$)

$$b_1+\cdots+b_k+b_{k+1}=(b_1+\cdots+b_k)+b_{k+1}, \tag{5}$$

它表明, 如果对 k 项确定了括号的位置, 那末 $k+1$ 项中括号的位置由公式也可确定.

归纳证明(4), 首先要证明 $n=1$ 时它正确, 这是显然的. 其次, 我们假定定律(4)对于 $n=k$ 正确, 要证明它对于 $n=k+1$ 正确. 根据定义(5)和分配律(v),

$$\begin{aligned}a(b_1+\cdots+b_k+b_{k+1})&=a[(b_1+\cdots+b_k)+b_{k+1}]\\&=a(b_1+\cdots+b_k)+ab_{k+1}.\end{aligned}$$

右边第一项可以利用(4)对于 k 个被加数正确的假设化简，于是上式化为

$$a(b_1+\cdots+b_k+b_{k+1})=(ab_1+\cdots+ab_k)+ab_{k+1}.$$

因为根据定义(5)，右边是 $ab_1+\cdots+ab_k+ab_{k+1}$，所以我们完成了(4)的归纳证明.

类似的但更为复杂的归纳论证将得到一般结合律，它断言：和 $b_1+\cdots+b_k$ 或积 $b_1\cdots b_k$ 不管把括号括在哪里都有相同的值(特殊情形出现在下面的习题 9)．应用这个结果和(4)，我们还可建立双边一般分配律

$$\begin{aligned}&(a_1+\cdots+a_m)(b_1+\cdots+b_n)\\&=a_1b_1+\cdots+a_1b_n+\cdots+a_mb_1+\cdots+a_mb_n.\end{aligned}$$

注意，根据一般结合律和一般交换律，k 个已知项的和不管项的次序与分组如何总有相同的值.

任意交换环 R 中的正整指数也可以归纳处理．如果 n 为正整数，则幂 a^n 表示 n 个因子的积 $aa\cdots a$. 这也可叙述为递推定义

$$a^1=a,\ a^{n+1}=a^na\qquad(\text{对 } R \text{ 中任意 } a),\tag{6}$$

根据这个公式，就可以用已经算出的低次幂 a^n 来计算幂 a^{n+1}．由这些定义，我们可以对任意正整指数 m 和 n 证明下面常用的定律：

$$a^ma^n=a^{m+n},\tag{7}$$

$$(a^m)^n=a^{mn},\ (ab)^m=a^mb^m.\tag{8}$$

例如，第一个定律可以对 n 用归纳法证明．当 $n=1$时，(7)式变成 $a^ma=a^{m+1}$，这正是 a^{m+1} 的定义．其次假定定律(7)对于任何 m 和已知正整数 $n=k$ 是正确的，并且考虑比 k 大 1 的指数 $k+1$ 的类似表达式 a^ma^{k+1}，我们逐次应用定义、结合律、归纳假设和定义，得到

$$a^ma^{k+1}=a^m(a^ka)=(a^ma^k)a=a^{m+k}a=a^{(m+k)+1}=a^{m+(k+1)},$$

这就是定律(7)的 $n=k+1$ 的情形. 因此完成了归纳证明.

最后，我们证明二项公式在任意交换环 R 上成立. 首先用递推公式

$$0!=1 \text{ 和 } (n+1)!=n!(n+1)$$

定义非负整数上的阶乘函数 $n!$. 然后对 $\mathbf{Z}$ 中的 $n\geqslant 0$, 类似地用

$$\binom{n}{0}=\binom{n}{n}=1 \text{ 和 } \binom{n+1}{k}=\binom{n}{k-1}+\binom{n}{k}$$

定义二项系数. 由这些定义, 再对 n 用归纳法, 得到

$$(x+y)^n=x^n+nx^{n-1}y+\cdots+\binom{n}{k}x^{n-k}y^k+\cdots+y^n$$

$$=\sum_{k=0}^{n}\binom{n}{k}x^{n-k}y^k \tag{9}$$

和

$$k!(n-k)!\binom{n}{k}=n!. \tag{10}$$

(即 $\binom{n}{k}=\dfrac{n!}{k!(n-k)!}$, 证明留作习题.)

数学归纳法原理允许我们在证明 $P(n+1)$ 时, 随意假定 $P(n)$ 的正确性. 我们现在指出, 人们甚至可以对一切 $k\leqslant n$ 假定 $P(k)$ 的正确性. 这称为

数学归纳法第二原理 设命题 $P(n)$ 与每个正整数 n 有关. 如果对每个 m, 由假设"$P(k)$ 对一切 $k<m$ 是正确的", 可以推出结论"$P(m)$ 本身是正确的", 那么 $P(n)$ 对一切 n 都是正确的.

证明 设 S 是使 $P(n)$ 错误的正整数集合. 如果 S 不空, 则它有最小的数 m. 根据 m 的选法, $P(k)$ 对一切 $k<m$ 是正确的, 因此根据假设, $P(m)$ 本身必是正确的, 这就得出矛盾. 于是 S 只能是空的. 证毕

注意，在 $m=1$ 的情形中，所有 $k<1$ 的集合是空的，因此必须暗含 $P(1)$ 的证明.

习　题

1. 用归纳法证明下列正指数定律在任意整环中成立：

(a) $(a^m)^n=a^{mn}$,

(b) $(ab)^n=a^nb^n$,

(c) $1^n=1$.

2. 用归纳法证明 $1+2+\cdots+n=\dfrac{n(n+1)}{2}$.

3. 证明公式(9)和(10).

4. 用归纳法证明：$x_1^2+\cdots+x_n^2>0$，除非 $x_1=\cdots=x_n=0$.

5. 用归纳法证明下列加法公式：

(a) $1+4+9+\cdots+n^2=\dfrac{n(n+1)(2n+1)}{6}$,

(b) $1+8+27+\cdots+n^3=\left[\dfrac{n(n+1)}{2}\right]^2$.

6. 证明：在任意有序整环中，负元素的任意奇次幂都是负的.

7. 用归纳法而不用良序原则证明定理 3.（提示：设 $P(n)$ 表示 $n\geqslant 1$.）

*8. 利用习题 7，由数学归纳法原理证明良序原则.（提示：设 $P(n)$ 为命题：任意包含一个 $\leqslant n$ 的数的一组正整数具有最小元素.）

9. 用定义(5)证明下面结合律：

$(a_1+\cdots+a_m)+(b_1+\cdots+b_n)=a_1+\cdots+a_m+b_1+\cdots+b_n$.

10. 给出两个函数之积的 n 阶导数公式，并对 n 用归纳法证明公式.

*11. 证明：对任何底 $a>1$，每个正整数 m 具有形如

$$a^nr_n+a^{n-1}r_{n-1}+\cdots+a^2r_2+ar_1+r_0$$

的唯一表达式，式中整数 r_k 满足 $0\leqslant r_k<a$，$r_n\neq 0$.

*12. 以下例说明习题 11：取 7 为底，变换方程 $63\cdot 111=6993$，并乘出来检验.

13. 药剂师仅有 1, 3, 9, 27 和 81 盎司五个砝码及双盘天平（砝码可放入任一盘中）．证明他能够称出 1～121 盎司的任意重量.

14. 证明：任意 9 的倍数其各位数字之和可被 9 整除.

§1.6 可 除 性

整系数方程 $ax=b$ 不总是有整数解 x. 如果有整数解, 则称 b 可被 a 整除. 数论首先要研究的就是这个问题.

在任意整环中也有类似的可除性概念, 定义如下:

定义 在整环 D 中, 如果有 D 中某一 q, 使 $b=aq$, 则称元素 b 可被元素 a 整除. 当 b 可被 a 整除时, 我们记作 $a|b$. 我们又称 a 是 b 的因子, b 是 a 的倍数. 1 的因子称为 D 的单位或可逆元素.

同相等关系 $a=b$ 一样, 关系 $a|b$ 满足自反律和传递律:

$$a|a; \qquad 由 a|b 和 b|c 可推出 a|c. \tag{11}$$

(11)的第一个定律是显然的, 因为 $a=a\cdot 1$ 意味着 $a|a$. 为证明第二个定律, 回想一下整除的定义, $a|b$ 和 $b|c$ 意味着有某整数 d_1 和 d_2, 使 $b=ad_1$ 和 $c=bd_2$, 将第一个方程代入第二个方程中得出 $c=a(d_1d_2)$. 因为 d_1d_2 是整数, 按照定义, 这表明 $a|c$, 同(11)中所断言的一样.

定理 5 $\mathbf{Z}$ 中仅有的单位是 ± 1.

这个定理实际上断言: 对于整数 a 和 b, $ab=1$ 意味着 $a=\pm 1$ 和 $b=\pm 1$. 根据积的绝对值定律, 由 $ab=1$ 得出 $|ab|=|a|\cdot|b|=1$. 因为 a, b 都不为零, 所以 $|a|$ 和 $|b|$ 是正数. 由于 0 与 1 之间没有正整数(定理 3), 因此根据三分律, $|a|\geqslant 1$ 和 $|b|\geqslant 1$. 这两个不等式随便哪个不等关系成立, 积 $|a||b|$ 就不可能是 1. 因此 $|a|=|b|=1$, 即如定理所言, $a=\pm 1, b=\pm 1$.

推论 如果整数 a 和 b 彼此可整除($b|a$ 且 $a|b$), 那么 $a=\pm b$.

证明 根据假设 $a=bd_1$ 且 $b=ad_2$, 因此 $a=ad_2d_1$. 如果 $a=0$, 则 $b=0$, 结论当然成立. 如果 $a\neq 0$, 消去 a 后得到 $1=d_2d_1$. 那么, 根据定理 5, $d_1=\pm 1$, 因此 $a=\pm b$. 证毕

因为 $a=a\cdot 1=(-a)(-1)$, 所以任意整数 a 可被 $a, -a, 1$, 和

-1 整除.

定义 如果整数 p 不为 0 或 ± 1, 并且 p 只能被 ± 1 和 $\pm p$ 整除, 那么称 p 为素数.

前几个正素数是

$$2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31,$$

不是 1 或素数的任何正整数都可分解成素因子的积, 例如

$$128 = 2^7, \qquad 90 = 9 \cdot 10 = 3^2 \cdot 2 \cdot 5,$$

$$672 = 7 \cdot 96 = 7 \cdot 12 \cdot 8 = 7 \cdot 3 \cdot 2^5,$$

经验表明, 不论怎样进行分解, 总会得到相同的素因子. 这种素因子分解的唯一性可以用下面我们将讨论的最大公因子来证明.

习　题

1. 证明任意整环 D 中单位的下列各性质:
   (a) 两个单位之积是单位.
   (b) D 的单位 u 可整除 D 中每个元素.
   (c) 若 c 整除 D 中每个 x, 则 c 是单位.
2. 证明: 若 $a|b$ 且 $a|c$, 则 $a|(b+c)$.
3. 证明: 若 b 是正的, 而且不是素数, 则它有正的素因子 $d \leqslant \sqrt{b}$.
4. 列出所有小于 100 的正素数. (提示: 删去 2, 3, 5, 7 的所有倍数, 并应用习题 3.)
5. 设 $a|b$, 证明: 当 $b \neq 0$ 时, $|a| \leqslant |b|$.

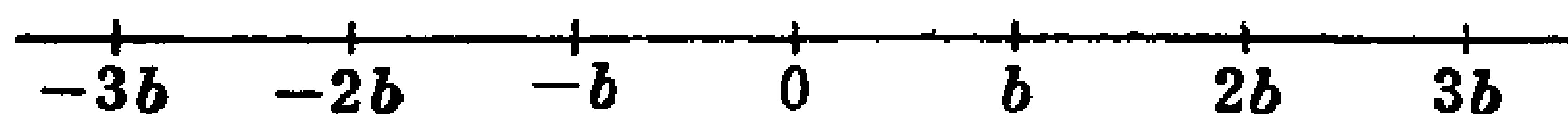
§1.7 欧几里得算法

整数 a 除以 b 用普通的除法就得到商 q 和余数 r. 正式地说, 这相当于下面的断语.

除法算式 对于给定的整数 a 和 b, $b>0$, 存在整数 q 和 r, 使得

$$a=bq+r, \qquad 0\leqslant r<b. \tag{12}$$

几何描述 如果我们设想全部数都显示在实轴上，那么 b 的所有可能倍数 bq 构成直线上等距分点的集合，



对应于 a 的点必落在由这些点确定的区间中的一个，比如说，落在 bq 和 $b(q+1)$ 之间的区间中，右端点除去．这意味着 $a-bq=r$，其中 r 表示短于区间全长 b 的长度，因此，如断言所述 $0\leqslant r<b$. 这个描述启发我们用良序的性质进行以下证明.

证明 当然存在 b 的某整数倍不超过 a，例如，因为 $b>0$，根据定理 3，$b\geqslant 1$，因此 $(-|a|)b\leqslant -|a|\leqslant a$. 所以差 $a-bx$ 的集合至少包含一个非负整数，即 $a-(-|a|)b$. 因此，根据良序的性质，存在最小非负的 $a-bx$，比如说，$a-bq=r$，由构造可知 $r\geqslant 0$. 而当 $r\geqslant b$，则 $a-b(q+1)=r-b\geqslant 0$ 将小于 $a-bq$，这与我们对 q 的选择相违背．由此得出结论：当 $a=bq+(a-bq)=bq+r$ 时，$0\leqslant r<b$.

推论 1 对给定的整数 a 和 b，满足(12) 的商 q 和余数 r 是唯一确定的.

证明 假设 $a=bq+r=bq'+r'$，式中 $0\leqslant r<b, 0\leqslant r'<b$，那么 $r-r'=b(q'-q)$ 数值上小于 b，但它是 b 的倍数．因此 $r-r'$ 必为零，所以 $r=r'$，$bq=bq'$，$q=q'$，这就得出 q 和 r 的唯一性.

证毕

我们常常有必要不涉及单个的整数而去处理某整数集合，象由 3 的所有倍数组成的集合：

$$\cdots, -6, -3, 0, 3, 6, 9, \cdots$$

这个集合具有重要性质：集合中的任意两个整数的和或差仍

然是集合中的整数. 一般地, 如果整数集合 S 包含 S 中任意两个整数 a 与 b 的和 $a+b$ 及差 $a-b$, 则称集合 S 在加法与减法之下是封闭的. 所有偶数(正的、负的和零)构成这样的集合. 更一般地, 任意固定的整数 m 的所有倍数 xm 的集合在加法与减法之下是封闭的, 这因为 $xm \pm ym=(x \pm y)m$ 是 m 的倍数. 我们现在证明: 这种倍数的集合是具有这些性质的唯一的整数集合.

定理 6 *在加法与减法之下封闭的任意非空整数集合, 不是仅由零组成, 就是包含最小正整数并由这个整数的所有倍数组成.*

证明 设这样的集合 S 包含元素 $a \neq 0$. 则 S 包含差 $a-a=0$, 因此包含差 $0-a=-a$. 所以 S 中至少有一个正元素 $|a|=\pm a$. 根据良序原则, S 中存在最小正元素 b.

集合 S 必包含 b 的所有整倍数. 这是因为我们首先可用归纳法(对 n)证明 b 的任何正倍数 nb 在 S 中: 若 $n=1$, 则 b 在 S 中; 若已知 kb 在 S 中, 则 $(k+1)b=kb+b$ 是 S 的两个元素之和, 因此在 S 中. 而 b 的任何负倍数 $(-n)b=0-(nb)$ 是 S 的两个元素之差, 因此也在 S 中.

集合 S 只能包含 b 的所有整倍数. 这是因为如果 a 是 S 的任意元素, 则由除法算式可得出差 $a-bq=r$, 它也在 S 中. 余数 r 非负且小于 b, 而 b 是 S 中的最小正元素, 因此 $r=0$, $a=bq$ 是 b 的倍数, 如断言所述. 证毕

定义 *如果整数 d 是整数 a 和 b 的公因子, 并且是任何其他公因子的倍数, 那么称 d 为 a 和 b 的最大公因子(g. c. d.). 用符号表示, d 必有性质*

$$d \mid a; \quad d \mid b; \quad \text{由 } c \mid a \text{ 和 } c \mid b \text{ 可推出 } c \mid d.$$

例如 3 和 -3 都是 6 和 9 的最大公因子. 按照定义, 两个不同的最大公因子必彼此整除, 因此它们仅相差一个符号. a 和 b 的两个可能的最大公因子 $\pm d$ 中, 正的最大公因子常用符号 (a, b) 表

示. 值得注意的是，最大公因子定义中的形容词“最大”，主要不是指d的数值比任何其他公因子c大，而是指d为任何这种c的倍数.

定理7 任意两个整数$a\neq 0$和$b\neq 0$有正的最大公因子(a,b). 它可表为a和b的具有整系数s和t的线性组合，形为

$$(a, b) = sa + tb. \tag{13}$$

证明 考虑形为$sa+tb$的数. 对于任意两个这样的数:

$$(s_1a+t_1b)\pm(s_2a+t_2b)=(s_1\pm s_2)a+(t_1\pm t_2)b.$$

所以，所有整数$sa+tb$的集合S在加法和减法之下是封闭的. 因此根据定理6, S由某一最小正整数$d=sa+tb$的所有倍数组成. 由此公式显然可知，a和b的任何公因子必是d的因子. 另一方面，原来的整数$a=1\cdot a+0\cdot b$和$b=0\cdot a+1\cdot b$都在所考虑的集合S之中，因此必为这个集合最小整数d的倍数. 换句话说，d是公因子. 因此它就是所要求的最大公因子. 证毕

类似地，a和b的公倍数的集合M在加法和减法之下是封闭的. 它的最小正元素m将是a和b的公倍数，它整除每个公倍数. 于是m是最小公倍数(或 l. c. m.).

定理8 任意两个整数a和b有最小公倍数$m=[a,b]$，它是a和b的每个公倍数的因子，并且它自己是a和b的公倍数.

为找到两个整数a和b的最大公因子的明显表达式，可应用所谓欧几里得(Euclid)算法. 我们可以假定a和b都是正的，因为负整数b可用$-b$代替，并不改变最大公因子$(a,b)=(a,-b)$. 除法算式给出

$$a=bq_1+r_1, \quad 0\leqslant r_1<b, \tag{14}$$

整除a和b的每个整数必整除余数r_1；反之，(14)中b和r_1的每个公因子是a的因子，所以a和b的公因子同b和r_1的公因子一样，因此最大公因子(a,b)和(b,r_1)相等. 这种简化可以在b和r_1

的位置上反复进行：

$$
\begin{aligned}
b &= r_1q_2+r_2, & 0<r_2<r_1,\\
r_1 &= r_2q_3+r_3, & 0<r_3<r_2,\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots & \cdots\cdots\cdots\\
r_{n-2} &= r_{n-1}q_n+r_n, & 0<r_n<r_{n-1},\\
r_{n-1} &= r_nq_{n+1}.
\end{aligned}
\tag{15}
$$

因为余数不断减小，最后必有余数 r_{n+1} 为零①，正象我们在最后一个方程中表示的那样．以上论证表明，所要求的最大公因子是

$$(a, b)=(b, r_1)=(r_1, r_2)=\cdots=(r_{n-1}, r_n),$$

但是(15)最后一个方程表明 r_n 本身是 r_{n-1} 的因子，因此最后一个最大公因子恰是 r_n 自己．于是已知整数 a 和 b 的最大公因子是欧几里得算法(14)和(15)中最后一个非零余数 r_n．

利用欧几里得算法，也可把最大公因子明显地表示为线性组合 $sa+tb$．这只要用 a 和 b 表示逐次的余数 r_i 就可做到．例如

$$
\begin{aligned}
r_1 &= a-bq_1=a+(-q_1)b,\\
r_2 &= b-q_2r_1=(-q_2)a+(1+q_1q_2)b,\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots
\end{aligned}
$$

这些方程的形式表明，我们最后能把 r_n 表为 a 和 b 的线性组合，它具有包含商 q_i 的整系数 s 和 t．

最大公因子的表达式 $(a, b)=sa+tb$ 非常有用．一个重要的推论是，整除两个数之积的素数必至少整除其中一个因子：

定理 9 *如果 p 为素数，那么由 $p|ab$ 可推出 $p|a$ 或 $p|b$．*

证明 根据素数定义，p 只有因子 ±1 和 $\pm p$．如果结论 $p|a$ 是错误的，则 p 和 a 的公因子只能是 ±1，因此 1 是 a 和 p 的最大公因子，并可表为 $1=sa+tp$．上式两边都乘以 b，我们有

---

① 为什么？其证明包含良序原则吗？

$$b = sab + tbp,$$

右边两项可被 p 整除，因此左边 b 可被 p 整除. 这就是定理中的第二种可能性. 证毕

如果 $(a, b) = 1$，那么我们称 a 和 b *互素*. 换句话说，如果两个整数 a 和 b 没有 ± 1 以外的公因子，则它们互素. 用来证明定理 9 的方法也可证明下面的推广：

定理 10 *如果 $(c, a) = 1$ 且 $c \mid ab$，那么 $c \mid b$.*

对于两个互素的整数 a 和 c，如果整数 m 是它们每一个的倍数，则我们可推出下面的一个结果. 因为这样的 m 有形式 $m = ad$，并可被 c 整除，所以根据定理 10，有 $c \mid d$，$m = ad = a(cd')$，因此乘积 ac 可整除 m. 这就证明了

定理 11 *如果 $(a, c) = 1$，$a \mid m$ 且 $c \mid m$，那么 $ac \mid m$.*

习　题

1. 利用欧几里得算法求最大公因子：

   (a) $(14, 35)$，　　(b) $(11, 15)$，

   (c) $(180, 252)$，　　(d) $(2873, 6643)$，

   (e) $(4148, 7684)$，　　(f) $(1001, 7655)$.

2. 把习题 1(a)，(b)，(c) 中的 (x, y) 写成形式 $sx + ty$（s，t 为整数）.

3. 证明：对任意整数 a，$(0, a) = |a|$.

4. 如果 $a > 0$，证明 $(ab, ac) = a(b, c)$.

5. 证明：由 $b \mid c$ 和 $|c| < b$ 推出 $c = 0$.（这个事实已用于证明推论 1.）

6. (a) 证明：任意三个整数 a, b, c 有最大公因子，它可表成

$$sa + tb + uc.$$

   (b) 证明 $((a, b), c) = (a, (b, c)) = ((a, c), b)$.

7. 讨论习题 3～5 和 6(b) 关于最小公倍数的情形.

8. 证明：在减法之下封闭的整数集合，在加法之下也必是封闭的.

9. 证明：仅在加法之下封闭的整数集合不一定由一个固定元素的所有倍数组成.

10. 在欧几里得算法中，对 k 用归纳法证明：每个余数可表成 $r_k=s_ka+t_kb$，式中 s_k 和 t_k 为整数.

11. 给出定理 10 的详细证明.

*12. 证明：对任意正整数 a, b，所有 $ma+nb$(m, n 为正整数)的集合包含大于 ab 的 (a, b) 的所有倍数.

13. 如果 q 为整数，使得对一切整数 a 和 b，由 $q|ab$ 可推出 $q|a$ 或 $q|b$. 证明：q 是 $0, \pm 1$ 或素数(参考定理9).

14. (a) 证明：若 $(a, m)=(b, m)=1$，则 $(ab, m)=1$.

(b) 证明：若 $(a, c)=d, a|b$ 且 $c|b$，则 $ac|bd$.

(c) 证明 $[a, c]=\frac{ac}{(a, c)}$.

§1.8 算术基本定理

现在我们容易证明整数唯一因子分解定理，它也称为算术基本定理.

定理 12 任意非零整数可表为单位 (± 1) 乘以正素数的积. 如果不计素因子出现的顺序，这种表示是唯一的.

证明 任意整数 a 能写成这样的乘积，可以用逐次把 a 分解成较小因子的办法来证明. 证明中用到数学归纳法第二原理，描述如下. 显然只考虑正整数 a 就够了.

设 $P(a)$ 为命题：a 能象定理 12 中所说的那样分解. 如果 $a=1$ 或 a 为素数，则 $P(a)$ 当然正确. 另一方面，如果 a 是复合数，那么 a 有一个正因子 b，它不是 1 也不是 a，因此 $a=bc$，其中 $b<a$，$c<a$. 但是根据数学归纳法第二原理，我们可假定 $P(b)$ 和 $P(c)$ 正确，所以 b 和 c 可表为素数之积：

$$b=p_1p_2\cdots p_r, \quad c=q_1q_2\cdots q_s,$$

对于 a，由上式得出复合数的表达式

$$a=bc=p_1p_2\cdots p_rq_1q_2\cdots q_s,$$

这就是所要求的形式.

为证明唯一性，我们必须考虑整数 a 的两个可能的素因子分解

$$a=(\pm 1)p_1p_2\cdots p_m=(\pm 1)q_1q_2\cdots q_n,$$

因为素数 p_i 和 q_j 都是正的，所以两种分解中的项 ± 1 必须一致. 第一个因子分解式中的素数 p_1 是乘积 $a=\pm q_1q_2\cdots q_n$ 的因子，因此反复应用定理 9，就有 p_1 必至少整除这个乘积的一个因子 q_j. 因为 $p_1|q_j$，并且二者都是正素数，所以 $p_1=q_j$. 重新排列分解式 $q_1q_2\cdots q_n$，使 q_j 第一个出现，那么 p_1 与 q_j 相消，留下

$$p_2p_3\cdots p_m=q_2'q_3'\cdots q_n',$$

式中符号"$'$"表示这些 q 的新的顺序. 继续这个过程直到所得方程的一边没有留下素因子. 此时方程的另一边也没有素因子. 所以在原来的因子分解式中，$m=n$. 把第二个因子分解式中的素因子重新排列，我们就使两个因子分解式完全一致，这同唯一性定理中所断言的一样. 证毕

数的因子分解中，同一个素数 p 可以出现几次. 把所出现的相同素数集中起来，分解式可写为：

$$a=\pm p_1^{e_1}p_2^{e_2}\cdots p_k^{e_k}\quad(1<p_1<p_2<\cdots<p_k). \tag{16}$$

由唯一性定理可知：这里每个素数 p_i 的指数 e_i 由给定的数 a 唯一确定.

习 题

1. 描述求两个整数的最大公因子和最小公倍数的系统过程，这两个整数的素数幂分解式(16)是已知的. 以 $a=216$, $b=360$ 和 $a=144$, $b=625$ 为例加以说明.（提示：对于能整除 a 或 b 中的一个而不能整除两个的素数，采用"哑"零分量是有益的.）

2. 如果 $V_p(a)$ 表示能整除非零整数 a 的素数 p 的最高次幂的指数，证明公式

（i）$V_p(a+b)\geqslant\min\{V_p(a), V_p(b)\}$,

(ii) $V_p((a, b))=\min\{V_p(a), V_p(b)\}$,

(iii) $V_p(ab)=V_p(a)+V_p(b)$,

(iv) $V_p([a, b])=\max\{V_p(a), V_p(b)\}$.

3. 如果$\|a\|=2^{-V_p(a)}$, 式中 $V_p(a)$的涵义同习题 2. 证明

$$\|ab\|=\|a\|\cdot\|b\| \text{ 和 } \|a+b\|\leqslant\max\{\|a\|, \|b\|\}.$$

*4. 设 $V(a)$是对一切非零整数 a 有定义的非负整值函数, 并且具有习题 2 中的性质(i)和(iii). 证明: $V(a)$ 或者恒为零, 或者是习题 2 中的一个函数 $V_p(a)$的常数倍. (提示: 首先确定某 p 适合 $V(p)>0$.)

5. 应用习题 2 的公式证明: 对于任意正整数 a 和 b, $ab=(a, b)[a, b]$. (对于第二种证明, 参看 § 1.7 的习题 14(c).)

6. 证明素数的个数是无限的(欧几里得). (提示: 若 $p_1, p_2, \cdots, p_n$ 为n个素数, 则这些素数没有一个能整除整数 $p_1p_2\cdots p_n+1$.)

*7. 定义函数 $e(n)$(n 为任意正整数)为 n 的素因子分解中出现的指数的最大公因子. 证明

(a) 对于 **Z** 中已知的 r 和n, 存在整数x 适合 $x^r=n$ 当且仅当 $r\mid e(n)$.

(b) $e(n^r)=re(n)$.

(c) 若 $e(m)=e(n)=d$, 则 $d\mid e(mn)$.

8. 如果正整数之积mn为二次幂,并且$(m,n)=1$,证明m和 n 都为二次幂.

*9. 假定整数x, y 和 z 没有 ±1 以外的公因子, 以 x, y 和 z 为边长的直角三角形可以按以下方式找到.

(a) 如果 $x^2+y^2=z^2$, 证明 x 和 y 不能都是奇数.

(b) 如果 y 是偶数, 应用习题 8 证明: $y=2mn$, 式中 m 和 n 为整数, $x=m^2-n^2$, $z=m^2+n^2$.

(提示: 分解因子 z^2-x^2, 并证明$(z+x, z-x)=2$.)

§1.9 同 余 式

在确定一天的时间时, 通常只计算到 12 小时, 超过 12 小时后重新开始计算. 这种抛弃固定数 12 的倍数的简单想法是"同余"这个算术概念的基础. 如果两个整数只差 12 的整数倍, 我们就称它们对模 12 同余. 例如, 7 和 19 是同余的, 我们把它记作

$$7 \equiv 19 \pmod{12}.$$

定义 $a \equiv b \pmod m$ 成立当且仅当 $m \mid (a-b)$.

我们也可以说：$a \equiv b \pmod m$ 的意思是差 $a-b$ 在 m 的所有倍数的集合中. 另外还可以根据下述事实来定义：每个整数 a 除以 m 剩下唯一的余数（§1.7 的推论 1）. 我们把这种定义叙述如下.

定理 13 两个整数 a 和 b 对模 m 同余当且仅当它们除以 $|m|$ 时剩下相同的余数.

因为 $a \equiv b \pmod m$ 当且仅当 $a \equiv b \pmod{-m}$，所以只须对于 $m>0$ 的情形证明这个定理.

证明 按照我们的定义，首先假定 $a \equiv b \pmod m$，那么 $a-b=cm$ 是 m 的倍数. b 除以 m 剩下余数 $b-qm=r$，式中 $0 \leqslant r < m$. 则

$$a=b+cm=(qm+r)+cm=(q+c)m+r.$$

这个方程表明，r 是 a 除以 m 的唯一的余数. 因此 a 和 b 具有相同的余数.

反过来，假设 $a=qm+r$，$b=q'm+r$，它们具有同一个余数 r. 那么 $a-b=(q-q')m$ 可被 m 整除，所以 $a \equiv b \pmod m$. 证毕

固定模 m 的同余关系具有下列性质，即相等关系的定律（§1.2）的再现. 对一切整数 a，b 和 c 有

$$\left.\begin{array}{ll} \text{自反律} & a \equiv a \\ \text{对称律} & a \equiv b \text{ 意味着 } b \equiv a \\ \text{传递律} & a \equiv b \text{ 和 } b \equiv c \text{ 意味着 } a \equiv c \end{array}\right\} \pmod m.$$

这些定律中的每一个都可以用同余的定义来证明. 按同余的定义，对称律要求由 $m \mid (a-b)$ 推出 $m \mid (b-a)$. 这里假设条件是 $a-b=dm$，把它写成 $b-a=(-d)m$，便得出结论 $m \mid (b-a)$.

固定模 m 的同余关系还具有“代换性质”，这也是相等关系的性质之一，即：同余整数之和同余，而且同余整数之积同余.

定理 14 如果 $a\equiv b(\mathrm{mod}\,m)$，那么对一切整数 x，有

$$a+x\equiv b+x,\quad ax\equiv bx,\quad -a\equiv -b\qquad (\mathrm{mod}\ m).$$

这里还用定义证明. 于是假设条件变成 $a-b=km$(对某个整数 k)，故有

$$m\mid(a+x-b-x),\ \ m\mid(ax-bx),\ \ m\mid(-a+b).$$

由此我们便可以导出结论.

对于方程成立的消去律对于同余式不一定成立. 例如，由 $2\cdot7\equiv2\cdot1(\mathrm{mod}\ 12)$ 不能推出 $7\equiv1(\mathrm{mod}\ 12)$. 之所以不能这样推断，是因为被消去的 2 是模的一个因子. 对于同余，最好也只能得到修改的消去律:

定理 15 当 c 与 m 互素时，

由 $ca\equiv cb(\mathrm{mod}\ m)$ 可推出 $a\equiv b(\mathrm{mod}\ m)$.

证明 根据定义，假设条件表明 $m\mid(ca-cb)$，或 $m\mid c(a-b)$. 但是已假定 m 与这个乘积的第一个因子 c 互素，因此由定理 10 得到 m 整除第二个因子 $a-b$. 这意味着 $a\equiv b(\mathrm{mod}\ m)$，如断言所述.

线性方程的讨论可以扩展到同余式上.

定理 16 如果 c 与 m 互素，那么同余式

$$cx\equiv b\qquad(\mathrm{mod}\ m)$$

有整数解 x. 任意两个解 x_1 和 x_2 对模 m 同余.

证明 根据假设 $(c,m)=1$，对适当的整数 s 和 t，有 $1=sc+tm$. 两边乘以 b，$b=bsc+btm$. 这里最后一项是 m 的倍数，因此 $b\equiv(bs)c(\mathrm{mod}\ m)$. 这就表明 $x=bs$ 是同余式 $b\equiv xc$ 所要求的解.

另一方面，因为同余关系满足传递律和对称律，所以这个同余式的两个解 x_1 和 x_2 必满足 $cx_1\equiv cx_2(\mathrm{mod}\ m)$. 因为已假设 c 与 m 互素，所以我们可以象定理 15 那样消去这里的 c，而得到所需

要的结论 $x_1 \equiv x_2 \pmod{m}$. 证毕

当模 m 为素数时，出现重要的特殊情形. 在这种情形下，不能被 m 整除的一切整数都与 m 互素. 由此得出

推论 如果 p 为素数，并且 $c \not\equiv 0 \pmod{p}$，那么 $cx \equiv b \pmod{p}$ 有模 p 的唯一解.

也可以解联立同余式.

定理 17 如果模 m_1 和 m_2 互素，那么同余式

$$\begin{aligned} x &\equiv b_1 \quad \pmod{m_1}, \\ x &\equiv b_2 \quad \pmod{m_2} \end{aligned} \tag{17}$$

有公共解 x. 任意两个解对模 $m_1 m_2$ 同余.

证明 对任意整数 y，$x = b_1 + y m_1$ 是第一个同余式的解. 这样的 x 又满足第二个同余式当且仅当 $b_1 + y m_1 \equiv b_2 \pmod{m_2}$ 或 $y m_1 \equiv b_2 - b_1 \pmod{m_2}$. 因为 m_1 与 m_2 互素，根据定理 16，这个同余式对 y 可解.

另一方面，假设 x 和 x' 是已知联立同余式(17) 的两个解. 那么 $x - x' \equiv 0 \pmod{m_1}$ 和 $\pmod{m_2}$. 因为 m_1 与 m_2 互素，这意味着差 $x - x'$ 可被乘积模 $m_1 m_2$ 整除，因此 $x \equiv x' \pmod{m_1 m_2}$.

证毕

上面同样的方法应用于形为

$$a_i x \equiv b_i \quad \pmod{m_i}$$

的两个或多个同余式，其中 $(a_i, m_i) = 1$，并且各个不同的模两两互素.

定理 18 (费马(Fermat)) 如果 a 为整数，并且 p 为素数，那么

$$a^p \equiv a \quad \pmod{p}.$$

证明 对固定的 p，设 $P(n)$ 为命题：$n^p \equiv n \pmod{p}$. 那么 $P(0)$ 和 $P(1)$ 显然正确. 在 $(n+1)^p$ 的二项展开式(9)中，除第一个和

最后一个系数外，每个系数都能被 p 整除，因此 $(n+1)^p\equiv n^p+1 \pmod p$，由 $P(n)$ 推出 $(n+1)^p\equiv n+1 \pmod p$，这就是命题 $P(n+1)$.

习　题

1. 解下列同余式:

   (a) $3x\equiv 2 \pmod 5$,

   (b) $7x\equiv 4 \pmod{10}$,

   (c) $243x+17\equiv 101 \pmod{725}$,

   (d) $4x+3\equiv 4 \pmod 5$,

   (e) $6x+3\equiv 4 \pmod{10}$,

   (f) $6x+3\equiv 1 \pmod{10}$.

2. 证明: 关系 $a\equiv b \pmod m$ 满足自反律和传递律.

3. 直接证明: 由 $a\equiv b \pmod m$ 和 $c\equiv d \pmod m$ 可推出 $a+c\equiv b+d \pmod m$ 和 $ac\equiv bd \pmod m$.

*4. (a) 证明: 同余式 $ax\equiv b \pmod m$ 有解当且仅当 $(a, m)\mid b$.

(b) 证明: 如果 $(a, m)\mid b$, 那么同余式恰有 (a, m) 个对模 m 不同余的解. (提示: 用 (a, m) 除 a, b 和 m.)

5. 如果 m 为整数, 证明: $m^2\equiv 0, 1$ 或 $4 \pmod 8$.

6. 证明: $x^2\equiv 35 \pmod{100}$ 无解.

*7. 证明: 如果 $x^2\equiv n \pmod{65}$ 有解, 那么 $x^2\equiv -n \pmod{65}$ 也有解.

8. 如果 x 为不能被 3 整除的奇数, 证明: $x^2\equiv 1 \pmod{24}$.

*9. (a) 列表指出 25～40 中所有可表为四个或不多于四个平方和的整数(这个结果实际上对于一切正整数都成立).

(b) 证明: 满足 $m\equiv 7 \pmod 8$ 的任何整数不能表为三个平方之和. (提示: 应用习题 5.)

10. 解联立同余式:

   (a) $x\equiv 2 \pmod 5$,
   $2x\equiv 1 \pmod 8$;

   (b) $3x\equiv 2 \pmod 5$,
   $2x\equiv 1 \pmod 3$.

11. 在一个荒岛上，五个人和一个猴子采了整整一天的椰子，然后去睡觉．第一个人醒来，决定拿走他的那份椰子．他把那些椰子分成五等份，并把剩下的一个椰子分给猴子，他藏起自己的那一份后，就去睡觉了．后来，第二个人醒来也在剩下的一堆椰子中取出他那五分之一，并把多余的一个分给猴子．其余三个人也都照样做一遍．求出原来摘下的一堆椰子的最小数目．(提示：列出同余式并用 -4 去试．)

*12. 用归纳法证明：定理 17 可以推广到 n 个同余式，其模两两互素．

*13. 证明：如果 $(m_1, m_2)=(a_1, m_1)=(a_2, m_2)=1$，那么联立同余式 $a_ix \equiv b_i \pmod{m_i}$ $(i=1, 2)$ 有公共解，并且任意两个解对模 m_1m_2 同余．

*14. 把习题 13 推广到 n 个联立同余式．

15. 对于什么样的正整数 m，命题"如果 $x^2\equiv 0 \pmod{m}$，那么也有 $x\equiv 0 \pmod{m}$"是正确的？

16. 如果 a 和 b 为整数，并且 p 为素数，证明：$(a+b)^p \equiv a^p+b^p \pmod{p}$．

§1.10 环 $\mathbf{Z}_n$

古代，人们已区分了"偶"数 2, 4, 6, …和"奇"数 1, 3, 5, …．下面计算偶数和奇数的法则是大家熟悉的：

$$
\begin{aligned}
&\text{偶数}+\text{偶数}=\text{奇数}+\text{奇数}=\text{偶数}\\
&\text{偶数}+\text{奇数}=\text{奇数}\\
&\text{偶数}\cdot\text{偶数}=\text{偶数}\cdot\text{奇数}=\text{偶数}\\
&\text{奇数}\cdot\text{奇数}=\text{奇数}
\end{aligned}
\tag{18}
$$

这些恒等式定义一个新的整环 $\mathbf{Z}_2$，它仅由两个元素 0("偶数")和1("奇数")组成，并且有加法表和乘法表：

$$0+0=1+1=0,\quad 0+1=1+0=1,$$

$$0\cdot 0=0\cdot 1=1\cdot 0=0,\quad 1\cdot 1=1.$$

我们现在要指出，类似的构造可用于对任意模 n 的全体剩余 0, 1, 2, …, $n-1$．两个这样的剩余相加(或相乘)，可以先简单进行普通意义下 (即在 $\mathbf{Z}$ 中)的加法(或乘法)，然后将所得结果取模 n 的剩余．在 $n=5$ 的情形中，其加法表和乘法表是：

+	0	1	2	3	4
0	0	1	2	3	4
1	1	2	3	4	0
2	2	3	4	0	1
3	3	4	0	1	2
4	4	0	1	2	3

·	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4
2	0	2	4	1	3
3	0	3	1	4	2
4	0	4	3	2	1

对于每个 n 所得到的系统都具有 § 1.1 的性质 (i)～(viii). 也就是说，我们有

定理 19 *在加法和乘法之下，对任意固定的模 $n\geqslant 2$，整数 0, 1, …, $n-1$ 的集合组成一个交换环 $\mathbf{Z}_n$.*

证明 在上一节里我们看到，关系 $x\equiv y\pmod n$ 同普通的相等关系一样，满足自反律、对称律和传递律. 事实上，根据定理14，由 $a\equiv b\pmod n$ 和 $c\equiv d\pmod n$，推出

$$a+c\equiv b+d\pmod n,\ ac\equiv bd\pmod n. \qquad (19)$$

也就是说，倘若 $\mathbf{Z}$ 中的"相等"重新解释为"对模 n 同余"，则公设 (i)和(ii)成立. 再有，$\mathbf{Z}$ 中的 0 和 1 在 $\mathbf{Z}_n$ 中分别起加法单位元素和乘法单位元素的作用，而 $n-k$ 是 k 对模 n 的加法逆元素.

剩下来证明公设(iii)～(v). 考虑分配律，因为对任意整数，有 $a(b+c)=ab+ac$，所以当取模 n 的剩余时，根据(19)，我们必有 $a(b+c)\equiv ab+ac\pmod n$. 这就是 $\mathbf{Z}_n$ 中的分配律. 交换律和结合律的证明也完全类似. 证毕

与整环定义唯一不相一致的公设是乘法消去律. 根据定理1，这个定律等价于断语：$\mathbf{Z}_n$ 中无零因子，即由 $ab=0$ 推出 $a=0$ 或 $b=0$. 这些方程在 $\mathbf{Z}_n$ 中表示普通整数的同余式，所以定律表述为：由 $ab\equiv 0\pmod n$ 推出 $a\equiv 0\pmod n$ 或 $b\equiv 0\pmod n$. 这等价于断语：由 $n|ab$ 推出 $n|a$ 或 $n|b$. 如果 n 是素数，这是正确的(定

理 9). 如果 n 不是素数, n 具有非平凡的因子分解 $n=ab$, 则 $n|ab$, 显然, $n|a$ 和 $n|b$ 都不成立, 因此 $\mathbf{Z}_n$ 有零因子. 这就证明了

定理 20 模 n 整数环 $\mathbf{Z}_n$ 是整环当且仅当 n 是素数.

还有其他更系统的方法构造模 n 整数的代数. 用等式代替同余式的方法本质上意味着: 把所有用 n 去除而剩下同样余数的整数归在一组, 产生一个新的"数". 每个这样的整数组称为"剩余类". 对于模 5, 有五个这样的类对应着可能的余数 0, 1, 2, 3 和 4, 其中的一些是

$$1_5=\{\cdots, -14, -9, -4, 1, 6, 11, 16, \cdots\},$$

$$2_5=\{\cdots, -13, -8, -3, 2, 7, 12, 17, \cdots\},$$

$$3_5=\{\cdots, -12, -7, -2, 3, 8, 13, 18, \cdots\}.$$

对于任意模 n, 由余数 $r(0\leqslant r<n)$ 确定的剩余类 r_n, 是由所有用 n 去除而剩下余数 r 的整数 a 组成. 每个整数属于一个且仅属于一个剩余类, 而且两个整数属于同一个剩余类当且仅当它们同余(定理 13). 模 n 有 n 个剩余类: $0_n, 1_n, \cdots, (n-1)_n$.

$\mathbf{Z}_n$ 的代数运算可以直接在这些类上进行. 假定两个剩余 r 和 s 在 $\mathbf{Z}_n$ 中给出剩余 t 作为它们的和, $r+s\equiv t \pmod n$. 如果我们用相应类中的任何其他元素来代替剩余 r 和 s, 便可得到上面的回答. 若 a 在 r_n 中, b 在 s_n 中, 则 $a+b$ 在属于和 t 的类 t_n 中, 这是因为, $a\equiv r$ 和 $b\equiv s$ 得出 $a+b\equiv r+s\equiv t \pmod n$. 一般地, 代数 $\mathbf{Z}_n$ 可以定义为这些剩余类的代数: 两个剩余类相加(或相乘), 可在这两个类中任意选择代表元素 a 和 b, 并求出含有这两个代表元素的和(或积)的剩余类. 如果 a_n 表示包含 a 的剩余类, 这个法则可表述为

$$(a+b)_n=a_n+b_n,\ (ab)_n=a_nb_n \tag{20}$$

例如, 上面列出的剩余类中, 和 $1_5+2_5=3_5$ 可以这样求出: 在剩余类 1_5 和 2_5 中任意选出代表元素 6 和 (-13), 把它们相加得 -7, 而

-7 在和类 3_5 中. 其他选法 $(-9)+(-3)=-12$, $11+7=18$, $(-14)+17=3$, 它们都给出同一个和 3_5.

我们利用剩余定义的剩余类也可以用 §6.13 中讨论的一般方法通过同余式直接定义.

习　题

1. 构造 $\mathbf{Z}_3$ 和 $\mathbf{Z}_4$ 的加法表和乘法表.

2. 在 $\mathbf{Z}_7$ 中计算: $(3\cdot4)\cdot5$, $3\cdot(4\cdot5)$, $3\cdot(4+5)$, $3\cdot4+3\cdot5$.

3. 求出 $\mathbf{Z}_{26}$ 和 $\mathbf{Z}_{24}$ 的全部零因子.

4. 对于 4_8 中的 x 和 y, 确定所有和 $x+y$ 的确切集合及所有积 xy 的确切集合. 它们与集合 4_8+4_8 及 $4_8\cdot4_8$ 有何关系?

5. 象证明定理 19 那样证明剩余类加法的结合律.

6. 对于实数 x 和 y, 设 $x\equiv y(\mathrm{mod}\ 2\pi)$ 表示 $x=y+2n\pi$, 对某整数 n. 证明: 剩余类的加法可以象 (20) 式那样定义, 而剩余类的乘法则不能这样定义.

*7. 证明: 在 $\mathbf{Z}_n$ 中, 不是单位的任何元素 c 是零因子.

*8. (a) 列出 $\mathbf{Z}_{15}$ 的单位.

(b) 证明: 若 $n=2m+1$ 是奇数, 则 $\mathbf{Z}_n$ 的单位的个数是偶数.

*9. 证明: k 是 $\mathbf{Z}_n$ 的单位当且仅当在 $\mathbf{Z}$ 中 $(k,n)=1$.

§1.11　集合·函数·关系

这一节我们暂时简短地讨论一下集合、函数、二元运算和关系等基本概念.

集合是一些数学对象完全任意的集体. 例如, 所有奇数的集合, 或平面上所有到两定点距离相等的点的集合. 如果 A 是集合, 则我们记 $x\in A$ 表示对象 x 是集合 A 的元素, 当 x 不是 A 的元素时, 记作 $x\notin A$. 有限集合可以通过列出它的所有元素来确定, 例如, $\{0,2,4\}$ 表示一个集合, 它仅有的元素是 0, 2 和 4. 更一般地, 任何集合由它的元素来确定. 在这种意义下, 两个集合 A 和 B 相

等(相同)当且仅当它们具有相同的元素. 这个原则 (称为外延性公理)也可用符号表达为: $A=B$ 的意思是, 对一切 x, $x\in A$ 当且仅当 $x\in B$. 这样得到的集合相等关系, 显然象§1.2 中对任意相等关系要求的那样, 满足自反律、对称律和传递律.

集合 S 称为集合 A 的子集当且仅当 S 的每个元素 x 也在 A 中, 符号 $S\subset A$ 表示 S 是 A 的子集. 如果 $T\subset S$ 和 $S\subset A$ 两者都成立, 那么显然有 $T\subset A$, 因此关系"$\subset$"满足传递律. 集合相等的条件也可变成: $A=B$ 当且仅当 $A\subset B$ 和 $B\subset A$ 两者都成立. 此外, 空集 $\varnothing$ (没有元素的集合)是每个集合的子集.

从任意集合出发, 比如全体整数的集合, 我们可以选出各种不同的子集: 所有正整数的集合, 所有正奇数的集合, 所有大于 18 的整数的集合, 等等. 这些例子说明一个原则: 任何性质都可确定一个子集; 更确切地说, 已知任意集合 A 和性质 P, 我们可以构成子集

$$S=\{x\mid x\in A, \text{并且 } x \text{ 具有性质 } P\}, \qquad (21)$$

它是由 A 中具有性质 P 的所有元素组成.

一般地, 如果 A 和 B 都是集合, 则关于 A 到 B 的函数 ϕ: $A\to B$ 是这样规定的, 它对 A 中每个元素 a 给定 B 中的一个元素 $a\phi$. 我们把它记作 $a\mapsto a\phi$. 例如 $x\mapsto x^2$ 是关于所有有理数的集合 $A=\mathbf{Q}$ 到所有非负有理数的集合 B 的函数 ϕ (它也可看作函数 $\phi:\mathbf{Q}\to\mathbf{Q}$). 还有"加一"运算 $n\mapsto n+1$, 它把每个整数 n 传送到 $n+1$, 因此它是一个函数 $\phi:\mathbf{Z}\to\mathbf{Z}$. 在任意有序整环 D 中, 取绝对值的运算是关于集合 D 到 D 中非负元素集合的一个函数. "取负"运算 $a\mapsto -a$ 是关于 D 到 D 的另一个函数.

关系 $a\mapsto a\phi$ 有时写成 $a\mapsto \phi a$ 或 $a\mapsto\phi(a)$, 这里函数的符号 ϕ 写在前面. 函数 $\phi:A\to B$ 也称为由 A 到 B 的映射、变换或对应. 集合 A 称为函数 ϕ 的定义域, 而 B 是函数 ϕ 的取值域. 例如, 通

常的电话拨号盘

ABC	DEF	GHI	JKL	MNO	PRS	TUV	WXY	Z
|/	|/	|/	|/	|/	|/	|/	|/	|
2	3	4	5	6	7	8	9	0

定义了关于 25 个字母(字母表略去 Q)的集合 A 到 10 个数字的集合 $\{0, 1, 2, \cdots, 9\}$ 的函数.

函数 $\phi: A\to B$ 的象(或“值域”)是所有函数“值”的集合，即所有 $a\phi$(a 在 A 中)的集合. 象是取值域 B 的子集，而不一定是整个 B. 例如电话拨号盘函数的象是略去了 1 的一个子集 $\{0, 2, \cdots, 9\}$.

函数 $\phi: A\to B$,当 B 的每个元素 b 是函数的象时，也就是说，当象是整个取值域时，称 ϕ 是*满射*(*映上*). 例如，整数取绝对值 $a\mapsto|a|$ 是关于 $\mathbf{Z}\to\mathbf{Z}$ 的函数，但它不是满射. 因为象是所有非负整数 $\mathbf{N}\subset\mathbf{Z}$，它是 $\mathbf{Z}$ 的真子集. 但是法则 $a\mapsto|a|$ 也定义了 $\mathbf{Z}\to\mathbf{N}$ 的函数，而它是满射. 为决定函数是否是映上的，我们必须知道预定的取值域.

函数 $\phi: A\to B$, 当 A 的不同元素总有不同的象，换句话说，当由 $a\phi=a'\phi$ 总可推出 $a=a'$ 时，则称 ϕ 是*单射*(*一一映入*). 例如，$x\mapsto 2x$ 是 $\mathbf{Z}\to\mathbf{Z}$ 的一个单射(但不是满射).

函数 $\phi: A\to B$, 当它既是单射又是满射，即当对每个元素 $b\in B$，有一个且仅有一个 $a\in A$ 具有象 b，使 $a\phi=b$，则 ϕ 是*双射*(*一一映上*). 例如，$n\mapsto n+1$ 是 $\mathbf{Z}\to\mathbf{Z}$ 的双射. 还有，对任意整环 D, $a\mapsto a$ 是 $D\to D$ 的双射. 双射 $\phi: A\to B$ 也称为(A 到 B 上的)*一一对应*，而不是单射的对应称为*多一对应*.

二元运算 数对的运算出现在很多方面——两个整数的加法，$\mathbf{Z}_n$ 中两个剩余类的加法，两个实数的乘法，一个整数减去另一个整数的减法，等等. 在这样情况下，我们称这些运算为*二元运*

算. 一般地，元素 $a, b, c, \cdots$ 的集合 S 上的二元运算"$\circ$"是这样规定：它对 S 中每个有序元素对 a 和 b 给出在同一集合 S 中唯一确定的第三个元素 $c=a\circ b$. 这里我们用"唯一"表示代换性质

$$由\ a=a'\ 和\ b=b'\ 推出\ a\circ b=a'\circ b', \tag{22}$$

同交换环的唯一性公设中所说的一样.

为方便起见，把所有有序元素对 (a, b)（其中 $a\in S, b\in T$）的集合记作 $S\times T$，这称为 S 和 T 的笛卡儿 (Cartersian) 积（或简称"积"）. 我们又把集合同自身的积 $S\times S$ 记作 S^2，那么二元运算同函数 $\circ: S^2\to S$ 一样.

两个已知整数之间可以有多种关系，例如"$a=b$"，"$a<b$"，"$a\equiv b\pmod 7$"，或"$a|b$". 上述每个语句都表示 a 和 b 之间的某个"二元关系". 我们可以容易地叙述其他类型的数学对象之间的许多别的关系，也有象人与人之间的"是…的兄弟"这样一类的非数学的关系. 为一般地讨论关系，我们引进符号 R 来表示任何关系（"R"代替"$<$"，"$\equiv$"或"$|$"，等等）. 形式上，如果已知集合 S 中的两个元素 a 和 b，不是 a 与 b 有关系 R（记号为 aRb），就是 a 与 b 没有关系 R（记号为 $aR'b$），那么"R"就表示集合 S 上的二元关系.

数学中特别重要的是考虑象同余和相等那样在集合 S 上满足下列定律的关系 R：

自反律　aRa，对 S 中一切 a.

对称律　由 aRb 可推出 bRa，对 S 中一切 a, b.

传递律　由 aRb 和 bRc 可推出 aRc，对 S 中一切 a, b, c.

满足自反律、对称律和传递律的关系称为等价关系. 例如，平面上三角形之间的全等关系就是这样的等价关系.

习　题

1. 下列整数 a 和 b 的二元运算 $a\circ b$ 中，哪些满足结合律？哪些满足交

换律？

$$a-b,\ a^2+b^2,\ 2(a+b),\ -a-b.$$

2. “自反律”，“对称律”和“传递律”三种性质中，哪一种适用于下列整数 a 和 b 之间的所有关系？

$$a\leqslant b,\ a<b,\ a\mid b,\ a^2+a=b^2+b,\ a<|b|$$

3. 上面三种性质对下列人的分类关系是否适合：“是…的父亲”，“是…的兄弟”，“是…的朋友”，“是…的叔叔”，“是…的子孙”. 如果这些关系被限定只用于一切男人的分类，那么你的回答中哪些会有变化？

*4. 关系“是…的叔叔”与关系“是…的兄弟”和“是…的父亲”是怎样联系的？你能叙述一个由两个已知关系做出新关系的类似的一般法则吗？

5. 如果关系 R 由 aRb 和 bRc 推出 cRa，则称 R 为循环的. 证明：关系 R 是自反的和循环的当且仅当它满足自反律、对称律和传递律.

*6. 下面由关系 R 的对称律和传递律推出自反律的“证明”其错误是什么？

“根据对称律，aRb 推出 bRa；根据传递律，aRb 和 bRa 推出 aRa.”

7. 下列法则中，每一个都定义一个函数 $f:\mathbf{Z}\to\mathbf{Z}$. 对每种情况详细说明其象，以及函数是否是单射.

(a) $a\mapsto|a|+1$,　　(b) $a\mapsto a^2$,

(c) $a\mapsto 2a+5$,　　(d) $a\mapsto \text{g.c.d.}(a,6)$.

8. 用正整数的集合 $\mathbf{Z}^+$ 代替 $\mathbf{Z}$，做习题 7.

9. 对什么样的整数 n，函数 $x\mapsto 6x+7$ 在 $\mathbf{Z}_n$ 上是双射？对什么样的 n，函数 $x\mapsto 6x+7$ 在 $\mathbf{Z}_n$ 上是满射？

10. 证明：集合 S 上任何关系 R 可以看作函数 $f:S^2\to\{0,1\}$.

§1.12 同构与自同构

近世代数最重要的概念之一是同构的概念. 我们现在对交换环如下定义这个概念：

定义 两个交换环 R 和 R' 之间的同构是 R 的元素 a 与 R' 的元素 a' 的一一对应 $a\leftrightarrow a'$，并对所有元素 a 和 b 满足条件

$$(a+b)'=a'+b',\ (ab)'=a'b'. \tag{23}$$

如果两个环 R 和 R' 之间存在这样的对应，则称它们是同构的.

基于规律(23)，我们可以说，同构 $a\leftrightarrow a'$ “保持和与积”．粗略地说，两个交换环当它们的元素仅仅区别于记号时，它们是同构的．一个恰当的例子是“偶数”和“奇数”的代数（象§1.10所讨论的那样）同整环 $\mathbf{Z}_2$ 比较．一一对应

$$偶数\leftrightarrow 0 \qquad 奇数\leftrightarrow 1$$

是这两个整环之间的同构，这是因为它们的对应元素是按照相同的法则(参看(18)式)相加和相乘的．

许多整环具有同它们自身的同构，这样的同构是很重要的，它称为自同构．类似于几何图形中的对称性(参看§6.1)．例如，考虑整环 $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$，在§1.1中它表示所有数 $m+n\sqrt{2}$ 的集合，其中 m 和 n 在整数环 $\mathbf{Z}$ 中，在非平凡的对应 $m+n\sqrt{2}\leftrightarrow m-n\sqrt{2}$ 之下，$\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$ 与它自身同构．这种对应是同构，因为对任意 $a=m+n\sqrt{2}$ 和 $b=m_1+n_1\sqrt{2}$，我们有

$$\begin{aligned}(ab)'&=[(m+n\sqrt{2})(m_1+n_1\sqrt{2})]'\\&=[(mm_1+2nn_1)+(mn_1+m_1n)\sqrt{2}]'\\&=(mm_1+2nn_1)-(mn_1+m_1n)\sqrt{2},\\a'b'&=(m-n\sqrt{2})(m_1-n_1\sqrt{2})\\&=(mm_1+2nn_1)-(mn_1+m_1n)\sqrt{2}.\end{aligned}$$

类似地有

$$(a+b)'=a'+b'.$$

任何同构 $a\leftrightarrow a'$ 不仅保持和与积，而且保持差．根据定义，$a-b$ 是方程 $b+x=a$ 的解，所以 $b+(a-b)=a$. 因为对应保持和，所以 $b'+(a-b)'=a'$，这就是说，$(a-b)'$ 是方程 $b'+x=a'$ 的(唯一解)，或者说

$$(a-b)'=a'-b'.$$

另一个法则是

$$0'=0,1'=1,(-a)'=-(a'). \tag{24}$$

总之，R 的零(单位元素)对应于 R' 的零(单位元素).

后面我们将看到，同构的概念普遍应用于代数系统. 我们甚至可以说，抽象代数是研究代数系统那些在同构之下仍保持不变的性质.

在把整数系描述为有序整环（其中每个正整数集合具有最小元素)时我们曾要求：对于所有的数学意义，这些公设完整地描述了全体整数. 现在我们可以把它叙述得更确切（将在§2.6中证明）. 任意有序整环当它所包含的全体正元素集合是良序的，它就同构于整数环 $\mathbf{Z}$. $\mathbf{Z}$ 的“精确到同构”的这个特征是最完全的了，它可用我们已用过的任何形式的公设系得到. 因为一般地，显然，如果系统 S 满足这样的公设系，而且 S' 是另一个同构于 S 的系统，那么 S' 也必满足这些公设. 因此，如果 S 满足加法交换律，则对 S 中一切 a 和 b, $a+b=b+a$. 由于在已知同构之下，它们的对应元素必相等，所以 $(a+b)'=(b+a)'$. 因为同构保持和，所以 $a'+b'=b'+a'$. 这就断言：交换律在 R' 中也成立. 这种论证具有一般性，可应用于我们的一切公设.

习　题

1. 证明：性质(24)对任意同构都成立.

2. 设 $\mathbf{Z}[\sqrt{3}]$ 是所有数 $m+n\sqrt{3}$ $(m, n\in\mathbf{Z})$ 的整环. 列出 $\mathbf{Z}[\sqrt{3}]$ 的一个非平凡自同构.

3. 证明：对应 $m+n\sqrt{2}\leftrightarrow m+n\sqrt{3}$ 不是整环 $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$ 和 $\mathbf{Z}[\sqrt{3}]$ 之间的同构.

4. (a) 证明：在任意同构之下，满足方程 $x^2=1+1$ 的元素 x 必对应于满足方程 $y^2=1'+1'$ 的元素 y.

(b) 利用(a)证明：$\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$ 和 $\mathbf{Z}[\sqrt{3}]$ 之间不可能有同构.

5. 证明：整数环 $\mathbf{Z}$ 没有非平凡的自同构.

*6. 证明：只含有三个元素的整环必同构于 $\mathbf{Z}_3$.

7. 证明：同构是等价关系(即满足自反律、对称律和传递律).

第二章　有理数和域

§2.1　域的定义

全体有理数组成的整环 **Q** 和全体实数组成的整环 **R**，具有整数环 **Z** 所不具备的极重要的代数特征：在它们之中，任何方程 $ax=b(a\neq 0)$ 是可解的．具有这个性质的交换环称为域．我们现在证明，在任何交换环中，如果所有非零元素有乘法逆，那么除法是可能的，并具有一些熟知的性质．

定义　如果 F 是一个交换环，并且对每个元素 $a\neq 0$，它都包含一个"逆"元素 a^{-1}，满足方程 $a^{-1}a=1$，那么 F 是域．

容易证明，在任何域中，§1.1 的消去律(ix) 是成立的．这是因为如果 $c\neq 0$，且 $ca=cb$，那么

$$a=1\cdot a=(c^{-1}c)a=c^{-1}(ca)=c^{-1}(cb)$$
$$=(c^{-1}c)b=1b=b.$$

换句话说，每个域是一个整环．更一般地，是域的子整环(根据相同的理由)．相反地，我们将在本节和下一节中指出，任何整环能够按照唯一的最小路径被扩张成域．我们通过把分数表为整数之商的标准表示法来说明扩张的方法．

定理 1　在任何域中，除法(零除外)是可能的而且是唯一确定的．

证明　我们来证明，在域 F 中，对给定的 $a\neq 0$ 和 b，方程 $ax=b$ 在 F 中有唯一解 x．如果 $a\neq 0$，可以用逆 a^{-1} 来构造一个元素 $x=a^{-1}b$，代入方程可以验证它就是 $ax=b$ 的解．这个解是唯一的，因为根据前面证过的消去律，当 $a\neq 0$ 时，由 $ax=b$ 和 $ay=b$ 可以

推出 $x=y$. 证毕

我们用 $\dfrac{b}{a}$（a 除 b 所得的商）表示 $ax=b$ 的解，特别，$\dfrac{1}{a}=a^{-1}$.

在被看作整环的域中，§1.2 中列举的所有代数运算法则都成立. 通常的商的运算法则也可以由域的公设来证明.

定理 2 在任何域中，商遵循下列法则（这里 $b\neq0, d\neq0$）：

(i) $\dfrac{a}{b}=\dfrac{c}{d}$ 当且仅当 $ad=bc$,

(ii) $\dfrac{a}{b}\pm\dfrac{c}{d}=\dfrac{ad\pm bc}{bd}$,

(iii) $\dfrac{a}{b}\cdot\dfrac{c}{d}=\dfrac{ac}{bd}$,

(iv) $\dfrac{a}{b}+\left(-\dfrac{a}{b}\right)=0$,

(v) $\dfrac{a}{b}\cdot\dfrac{b}{a}=1$, 当 $\dfrac{a}{b}\neq0$.

(i)的证明 假设条件 $\dfrac{a}{b}=\dfrac{c}{d}$ 意味着 $ab^{-1}=cd^{-1}$，由此得

$$ad=a(b^{-1}b)d=cd^{-1}(bd)=cd^{-1}db=bc.$$

反过来，如果 $ad=bc$，那么

$$\frac{a}{b}=b^{-1}a=b^{-1}add^{-1}=b^{-1}bcd^{-1}=cd^{-1}=\frac{c}{d},$$

即所要证的.

(ii)的证明 注意到 $x=\dfrac{a}{b}$ 和 $y=\dfrac{c}{d}$，分别表示 $bx=a$ 和 $dy=c$ 的解，这些方程还可以组合成

$$dbx=da, bdy=bc, bd(x\pm y)=ad\pm bc.$$

于是 $x\pm y$ 是方程 $bdz=ad\pm bc$ 的唯一解 $z=\dfrac{ad\pm bc}{bd}$.

(iii)的证明 如上所述，方程 $bx=a$ 和 $dy=c$ 可组合成

$$(bd)(xy)=(bx)(dy)=ac,$$

因此
$$xy=\frac{ac}{bd}.$$

(iv)的证明 在(ii)中用 $-\frac{a}{b}$ 代替 $\frac{c}{d}$，我们有

$$\frac{a}{b}+\left(-\frac{a}{b}\right)=\frac{ab-ba}{b^2}=\frac{0}{b^2}=0(b^2)^{-1}=0.$$

(v)的证明 在(iii)中用 $\frac{b}{a}$ 代替 $\frac{c}{d}$，我们有 $\frac{a}{b}\cdot\frac{b}{a}=\frac{ab}{ba}$，而 $\frac{ab}{ba}$ 是方程 $bax=ab$ 的唯一解. 显然，$x=1$ 满足这个方程，因此 $\frac{ab}{ba}=1$.

证毕

用类似于刚用过的那些论证，可以证明下列其他熟悉的定律：

$$(bd)^{-1}=d^{-1}b^{-1},\ (-b)^{-1}=-(b^{-1}),\ 当\ b,d\neq 0. \tag{1}$$

$$a\pm\frac{b}{c}=\frac{ac\pm b}{c},\ a\frac{b}{c}=\frac{ab}{c},\ 当\ c\neq 0. \tag{2}$$

$$\frac{a}{b}\Big/\frac{c}{d}=\frac{ad}{bc},\ \frac{a}{b}\Big/c=\frac{a}{bc},\ \frac{a}{1}=a,$$
$$当\ b,c,d\neq 0. \tag{3}$$

$$-\frac{a}{b}=\frac{-a}{b}=\frac{a}{-b},\quad \frac{-a}{-b}=\frac{a}{b},\quad 当\ b\neq 0. \tag{4}$$

其证明将留给读者作习题.

存在各种各样的域. 例如，对任意素数 p，§ 1.10 中所构造的整环 $\mathbf{Z}_p$ 是一个域. 这由 § 1.9 定理 16 的推论可以得到. 再有，如果我们假定全体实数构成一个域，那么我们利用子域的概念可以容易地构造出其他域的例子.

定义 如果一个给定的域 F 的子集在 F 中的加法和乘法运算之下构成一个域，那么称这个子集为域 F 的子域.

只要问题中的运算能够进行，那么所有在 F 中成立的恒等式

(即交换律、结合律和分配律)在F的任何子集中自然成立. 因此在检验F的子集S是否是子域时, 我们可以不管那些恒等式的公设, 而只须检验那些包含某个“存在性”的公设, 比如, 逆元素的存在性. 这就给出下面的结果:

定理 3 *如果域F的子集S包含着F中的零元素和单位元素, S在加法和乘法之下是封闭的, S中每个a在S中有它的负元素和它的逆元素a^{-1}(假定$a\neq 0$), 那么S是子域.*

现在用定理 3 可以证明, 所有形如$a+b\sqrt{2}$的实数的集合是实数域的一个子域, 其中系数a和b是有理数. 这个子域通常记作$\mathbf{Q}(\sqrt{2})$, 这里$\mathbf{Q}$表示有理数域. 可以应用定理 3 是因为, $\mathbf{Q}(\sqrt{2})$中任意两个数的和是另一个同样形式的数, 类似地, 两个数的积是

$$(a+b\sqrt{2})(c+d\sqrt{2})=(ac+2bd)+(bc+ad)\sqrt{2}.$$

再有, $\mathbf{Q}(\sqrt{2})$包含$0=0+0\sqrt{2}$, $1=1+0\sqrt{2}$, 并且如果它包含$a+b\sqrt{2}$, 则也包含

$$-(a+b\sqrt{2})=-a-b\sqrt{2}.$$

最后, 任何非零元素的逆元素$(a+b\sqrt{2})^{-1}$可以通过“分母有理化”来求出,

$$\frac{1}{a+b\sqrt{2}}=\frac{1}{a+b\sqrt{2}}\left(\frac{a-b\sqrt{2}}{a-b\sqrt{2}}\right)$$
$$=\frac{a}{a^2-2b^2}-\frac{b}{a^2-2b^2}\sqrt{2}.$$

新的分母a^2-2b^2不会是零(在§3.6中将给出证明), 求得的逆元素具有所要求的形式$a'+b'\sqrt{2}$, 其中系数

$$a'=\frac{a}{a^2-2b^2},\qquad b'=-\frac{b}{a^2-2b^2}$$

是有理数. 我们容易验证, 这个逆元素确实满足方程

$$(a'+b'\sqrt{2})(a+b\sqrt{2})=1.$$

类似地，所有实数 $a+b\sqrt[3]{5}+c\sqrt[3]{25}$的集合$\mathbf{Q}(\sqrt[3]{5})$是一个域，其中 a, b, c 是有理数. 几乎同 $\mathbf{Q}(\sqrt{2})$一样，在这个集合中，加法、减法和乘法可以进行，这里用到这样一个事实：$(\sqrt[3]{5})^3=5$ 是有理数. 最后，由于方程式

$$(a+b\sqrt[3]{5}+c\sqrt[3]{25})(x+y\sqrt[3]{5}+z\sqrt[3]{25})$$
$$=1+0\sqrt[3]{5}+0\sqrt[3]{25}$$

等价于一个联立线性方程组，而方程组总是能够解出 x, y 和 z，除非 $a=b=c=0$，于是$(a+b\sqrt[3]{5}+c\sqrt[3]{25})^{-1}$ 可以计算出来.

如果我们假定存在一个由所有复数 $a+bi$ 构成的域，其中 $i=\sqrt{-1}$, a 与 b 是实数，那么我们还可以构造其他子域.二次方程

$$\omega^2+\omega+1=0$$

在复数中有根 $\omega=\dfrac{-1+\sqrt{-3}}{2}=-\dfrac{1}{2}+\dfrac{\sqrt{3}}{2}i$. (注意，因为

$$\omega^3-1=(\omega-1)(\omega^2+\omega+1)=0,$$

所以 ω 是一个“虚”的单位立方根！)所有数 $a+b\omega$(a, b 为有理数)构成复数域的一个子域 $\mathbf{Q}(\omega)$，这是因为

$$(a+b\omega)+(c+d\omega)=(a+c)+(b+d)\omega,$$
$$(a+b\omega)(c+d\omega)=ac+(bc+ad)\omega+bd\omega^2$$
$$=(ac-bd)+(bc+ad-bd)\omega,$$

这里用了等式 $\omega^2=-\omega-1$ 来去掉 ω^2 项. 进一步，对任意 $a+b\omega\neq 0$，它在这个集合中有一个逆元素，这是因为

$$(a+b\omega)\left[\frac{-(b-a+b\omega)}{a^2-ab+b^2}\right]=\frac{a^2-ab+b^2}{a^2-ab+b^2}=1.$$

这个逆元素中的分母 a^2-ab+b^2 决不会是零，因为

$$a^2-ab+b^2=\frac{a^2+b^2}{2}+\frac{(a-b)^2}{2}$$

一定是正的，除非 $a=b=0$.

习　题

1. 从域的公设出发证明公式(1)～(4).

2. 在 $\mathbf{Z}_{11}$ 中,对每个 $c\neq 0$,列出 c^{-1} 的表.

3. 如果假定实数集合是一个域,下列实数子集中哪一个是域?

(a) 全体正整数.

(b) 全体形如 $a+b\sqrt{3}$ 的数,此处 a, b 是有理数.

(c) 全体形如 $a+b\sqrt[3]{5}$ 的数,此处 a, b 是有理数.

(d) 全体不是整数的有理数.

(e) 全体数 $a+b\sqrt{5}$,此处 a, b 是有理数.

4. 证明:在定理 3 中,条件"$0\in S$ 和 $1\in S$"可用条件"S 至少包含两个元素"代替.(提示:考虑 $ax=a$.)

*5. 证明:由 § 1.1 中的公设(i),(ii)和(iv)～(vii)以及下面的(viii'),可以推出定律 $a+b=b+a$.

(viii') 对 R 中每个 a,方程 $a+x=0$ 和 $y+a=0$ 在 R 中有解 x 和 y.

6. 每个与域同构的整环本身是域吗?为什么?

7. 证明:有理数域 $\mathbf{Q}$ 的唯一的子域是 $\mathbf{Q}$ 本身.

8. 对于子整环,叙述并证明类似于定理 3 的定理.

9. 证明:$\mathbf{Q}(\sqrt{2})$ 的子域或者是 $\mathbf{Q}$ 本身,或者是整个域 $\mathbf{Q}(\sqrt{2})$.

10. 如果 S 和 S' 是给定的域 F 的两个子域,证明 S 和 S' 公共元素的集合也是一个子域.

11. 你能叙述关于 $\mathbf{Z}$(以及 $\mathbf{Z}_n$)的可能子整环的一般性定理吗?

*12. 构造四元素域的加法表和乘法表,假定这四元素域满足 $1+1=0$(加法是模 2 的),并且存在元素 x,使得 $x^2=x+1$.

*13. 找出习题 12 的域的子域.

§ 2.2　有理数域的构造

在第一章中假定了全体整数的良序整环 $\mathbf{Z}$ 的存在,现在我们将严格地证明,有理数域 $\mathbf{Q}$(有序的)能够由 $\mathbf{Z}$ 构造出. 实际上,更一般地,我们将证明,类似的构造可以应用到任何整环上去.

仅仅由全体整数不能构成域,由整数构造有理数在本质上恰

是构造了包含全体整数在内的域. 显然, 这个域还必须包含所有方程 $bx=a$ 的解, 其中系数 $a, b\neq 0$ 都是整数. 为了从这些方程的解抽象地构造"有理数", 我们简单地引入某些新记号(或称数偶) $r=(a,b)$, 每个记号代表一个方程 $bx=a$ 的解. 为此我们必须说明, 这些新记号完全象域中的商 $\frac{a}{b}$ 那样可以相加、相乘和相等(定理 2 (i)～(iii)).

不管我们从整数环 $\mathbf{Z}$, 还是从其他一些整环 D 出发, 上述的说明是很有意义的. 这可以确切地描述如下:

定义 设 D 为任意整环. D 的商域 $Q(D)$ 是由所有数偶 (a,b) 组成, 其中 $a, b\in D$ 并且 $b\neq 0$. 这种数偶的"相等"由下面约定来确定:

$$(a,b)\equiv(a',b') \text{ 当且仅当 } ab'=a'b, \tag{5}$$

而数偶的和与积分别由下列约定来确定:

$$(a,b)+(a',b')=(ab'+a'b, bb'), \tag{6}$$

$$(a,b)\cdot(a',b')=(aa', bb'). \tag{7}$$

注意, 因为 D 不包含"零因子"(§ 1.2 定理 1), 在(6)和(7)中的乘积 $bb'\neq 0$, 所以 $Q(D)$ 在加法和乘法之下是封闭的.

我们希望数偶之间的"同余"关系"≡"与相等关系一致. 由于这个关系不是正式的恒等关系((a,b) 与 (a',b') 恒等的意思是 $a=a'$, $b=b'$), 所以我们必须证明, 这个同余具有 § 1.2 中列举的相等的性质(对于正式的恒等, 这些性质将是显然的). 首先我们通过直接的论证可以证明"≡"满足自反律、对称律和传递律. 其次, 和与积在同余意义下是唯一确定的. 例如, 由 $(a,b)\equiv(a',b')$ 可推出 $(a,b)+(a'',b'')\equiv(a',b')+(a'',b'')$. 上面结论中的每个和用(6)式那样的公式给出, 而且所得的这两个数偶在(5)式的意义下是同余的当且仅当

$$(ab''+a''b)b'b''=(a'b''+a''b')bb''.$$

而这个等式是由假设条件$(a,b)\equiv(a',b')$(即$ab'=a'b$)得出. 类似地,对于乘积的唯一性断言也是成立的. 我们得出结论, 由(5)式定义的相等具有所要求的性质.

现在可以验证 $Q(D)$ 中的各种代数定律. 例如分配律,根据定义(6)和(7), 按照下面的方法我们可以一步一步地化简定律的每一边. 设 r, r' 和 r'' 是任意三个数偶,

$r(r'+r'')$	$rr'+rr''$
$(a,b)[(a',b')+(a'',b'')]$	$(a,b)(a',b')+(a,b)(a'',b'')$
$(a,b)(a'b''+a''b',b'b'')$	$(aa',bb')+(aa'',bb'')$
$(aa'b''+aa''b',bb'b'')$	$(aa'bb''+aa''bb',bb'bb'')$.

最后一行的两边给出了在(5)的意义下相等的数偶,这是因为右边与左边的差别只是在右边所有项中多出现一个非零因子 b, 在数偶中这样一个额外因子使数偶总保持相等,即$(bx,by)\equiv(x,y)$,因为根据(5)式这个等式相当于恒等式$bxy=byx$.

$Q(D)$中这个分配律的清楚的证明只作为证例. 同样, 我们可以直接运用D中的定义和定律证明结合律和交换律. 加法单位元素(零)是数偶(0, 1), 因为

$$(0,1)+(a,b)=(0\cdot b+1\cdot a,1\cdot b)=(a,b).$$

同样,消去律也成立,并且数偶(1, 1)是乘法单位元素. (a,b)的负元素是 $-(a,b)=(-a,b)$. 这就验证了 § 1.1 中所列的关于整环的一切公设.

定理 4 对任意整环 D, 商域 $Q(D)$是一个域.

证明 剩下只须证明每个方程 $rx=1$(其中 $r\neq 0$) 在 $Q(D)$ 中有一个解. 也就是说, 对每个 $r\neq 0$, 在 $Q(D)$中存在 r 的逆元素. 这是容易证明的. 更一般地, 任意方程

$$(a,b)(x,y)\equiv(c,d), 其中 (a,b)\not\equiv(0,1), \tag{8}$$

由(3)式给出一个解，即

$$(x, y) = (bc, ad). \tag{8'}$$

这是因为，把 x, y 的值直接代入方程后有

$$(a, b)(bc, ad) = (abc, bad)$$

又因为 $abcd = badc$，所以 $(abc, bad) = (c, d)$. 假设条件 $(a, b) \not\equiv (0, 1)$ 保证了 $a \neq 0$，因此 (x, y) 的第二项 ad 不为零. 正如有理数定义所要求的那样. 证毕

我们现在希望证明，$Q(D)$ 实际上包含着原来的整环 D 作为它的子整环，换句话说，$Q(D)$ 实际上是 D 的扩张. 严格说来，这是不可能的，因为数偶 (a, b) 不象 D 中那样的元素. 不过我们可以把每个 $a \in D$ 与 $(a, 1)$ 联系起来，在相等、加法和乘法之下，$(a, 1)$ 具有的性质完全象 a 一样，如下所示：

$$(a, 1) + (b, 1) = (a \cdot 1 + b \cdot 1, 1 \cdot 1) = (a + b, 1),$$

$$(a, 1) \cdot (b, 1) = (a \cdot b, 1 \cdot 1) = (ab, 1),$$

$$(a, 1) \equiv (b, 1) \text{ 当且仅当 } a = b.$$

我们可以断定，一一对应 $a \leftrightarrow (a, 1)$ 是给定的整环 D 到域 $Q(D) = F$ 的子整环上的一个同构. 此外，方程(8)和(8′)表明，任何数偶 $r = (a, b) \in Q(D)$ 是方程 $(b, 1)r = (a, 1)$ 或者 $br = a$ 的解，因此 $r = (a, b)$ 是商 $\frac{a}{b}$，这就证明了

定理 5 任何整环 D 能够同构地嵌入域 $Q(D)$ 中，$Q(D)$ 的每个元素是 D 中两个元素的商.

特别，把定理 5 用到整数环 $\mathbf{Z}$ 上. 事实上在上述论证中始终想到 $D = \mathbf{Z}$ 这一特殊情形，因此 $Q(D) = Q(\mathbf{Z})$ 是全体普通分数的集合. 所以我们有

推论 整数环 $\mathbf{Z}$ 可以作为子整环嵌入域 $\mathbf{Q} = Q(\mathbf{Z})$ 中，域 $\mathbf{Q}$ 的每个元素是整数的商 $\frac{a}{b}$，其中 $b \neq 0$.

我们现在指出，有理数域 $\mathbf{Q}=Q(\mathbf{Z})$ 实际上已通过前面的论述被精确地表征出来(精确到同构). 因为 $\mathbf{Z}$ 是由它的公设所定义(仅精确到同构)，所以这象我们所希望的那样是完备的表征. 事实上，我们将证明，任何整环 D 都有类似的结果.

定理 6 设整环 D 作为子整环包含在任意一个域 F 中，那么 F 中所有形为 $\frac{a}{b}$(其中 $a, b\in D,\ b\neq 0$) 的元素组成的集合是 F 的一个子域 S，并且在对应 $\frac{a}{b}\leftrightarrow(a, b)$ 之下这个子域 S 与 $Q(D)$ 同构.

注 两个域 F 和 F' 之间的同构是指，把 F 和 F' 看作交换环时它们之间的同构. 特别，它是 F 和 F' 之间满足下列性质的一一对应，即如果 $x\leftrightarrow x'$ 和 $y\leftrightarrow y'$，那么

$$(x+y)\leftrightarrow(x'+y') \text{和} (xx')\leftrightarrow(yy').$$

证明 域 F 包含商 $\frac{a}{b}$，这个商是方程 $bx=a$ 的解，其系数 a 和 $b\neq 0$ 在 D 中，所有这些商的集合 S 包含所有整数 $\frac{a}{1}=a$. 根据定理 2 中的法则，S 在加法、减法、乘法和除法之下是封闭的，于是，在 F 的这些运算之下，S 可以描述成 D 的闭包. 总之，S 是一个域(定理 3).

这些商 $\frac{a}{b}$ 以定理 2 的(i)～(iii)所描述的方式进行相加、相乘以及表示相等，完全相同的法则用到数偶 (a, b) 上，因此对应 $\frac{a}{b}\leftrightarrow(a, b)$ 是 D 的闭包 S 到 $Q(D)$ 上的一个同构. 证毕

特别注意，这个对应把 D 中每个 a 映上到 $\frac{a}{1}\leftrightarrow(a, 1)=a$.

联合定理 6 和前面的推论我们得到

定理 7 整数环 $\mathbf{Z}$ 可以按照一种且只有一种方式被嵌入域

$\mathbf{Q}=Q(\mathbf{Z})$中，使得 $\mathbf{Q}$ 的每个元素是两个整数的商.

这就完成了由整数环 $\mathbf{Z}$ 构造有理数域 $\mathbf{Q}$.

习　题

1. 详细证明：数偶乘法的交换律和结合律.

2. 证明：由(5)所定义的"相等"关系满足自反律、对称律和传递律.

3. 设 $\mathbf{Z}[i]$ 是所有复数 $a+bi$ 的集合，这里 a 和 b 为整数，$i^2=-1$.

   (a) 清楚地叙述两个这样的数是怎样相加和相乘的.

   (b) 证明它们构成一个整环.

   (c) 描述它的商域.

4. 模 6 整数环 $\mathbf{Z}_6$ 能够嵌入一个域吗？为什么？

5. 描述模 5 整数环 $\mathbf{Z}_5$ 的商域.

6. 域 $\mathbf{Q}$ 的商域是什么？把它一般化.

7. 证明：在两个域之间的任何同构 $F\leftrightarrow F'$ 之下，由 $a\leftrightarrow a'$，$b\leftrightarrow b'$ 和 $c\leftrightarrow c'$（假定 $c\neq0$）可推出 $c^{-1}\leftrightarrow c'^{-1}$ 和 $\frac{a-b}{c}\leftrightarrow\frac{a'-b'}{c'}$（见 §1.12 习题 1）.

8. 证明：对应 $a+b\sqrt{7}\leftrightarrow a+b\sqrt{11}$（$a, b$ 为有理数）不是同构.

*9. 证明：形为 $a+b\sqrt{7}$ 的数构成的域 $\mathbf{Q}(\sqrt{7})$ 与形为 $a+b\sqrt{11}$ 的数构成的域 $\mathbf{Q}(\sqrt{11})$ 之间不存在同构（a, b 为有理数）.（提示：证明没有元素能与 $\sqrt{7}$ 对应.）

10. 关于从同构的整环 D 和 D' 产生的 $\frac{a}{b}$ 和 $\frac{a'}{b'}$ 所构成的商域，你能说些什么？并证明你的命题.

*11. 证明：既不是 0 也不是 ±1 的任何有理数可以唯一地表示成 $\pm p_1^{e_1}\cdots p_r^{e_r}$ 的形式，其中 p_i 是正素数，适合 $p_1<p_2<p_3<\cdots<p_r$，指数 e_i 是正整数或负整数.

*12. 证明：任何有理数 $\frac{r}{s}\neq0$ 可以唯一地表示成

$$\frac{r}{s}=b_1+\frac{b_2}{2!}+\frac{b_3}{3!}+\cdots+\frac{b_n}{n!}$$

的形式，其中 n 为适当的整数，每个 b_k 是整数，适合 $0\leqslant b_k<k$，当 $k>1$，并且 $b_n\neq0$.

13. 设 p 为固定的素数，证明：适合 n 与 p 互素的所有有理数 $\frac{m}{n}$ 的集合 $\mathbf{Z}_{(p)}$ 是一个整环. $\mathbf{Z}_{(p)}$ 与它的商域是一致的.

14. 找出 $\mathbf{Q}$ 中包含有理数 $\frac{1}{6}$ 和 $\frac{1}{5}$ 的最小子整环.

*15. 描述 $\mathbf{Q}$ 的所有可能的子整环.

16. 证明：任何恰有两个元素的域与 $\mathbf{Z}_2$ 同构.

17. 设整环 $\mathbf{Z}[\sqrt{3}]$ 是由所有数 $a+b\sqrt{3}$ 组成，其中 a 和 b 为整数，证明这个整环有一个商域，它同构于所有形为 $r+s\sqrt{3}$ 的实数组成的集合，其中 r 和 s 是有理数，并得到一个明显的同构.

§2.3 联立线性方程

一个域不一定由通常的"数"组成，比如，如果 p 为素数，则所有模 p 的整数就构成一个只包含有限多个不同(即不同余)元素的域. 整环 $\mathbf{Z}_p$ 是域这个事实是下面定理的推论.

定理 8 任何有限整环 D 是一个域.

证明 D 是有限的这个假设意味着 D 的元素全部可以列出来，排成 $b_1, b_2, \cdots, b_n$，此处 n 为某正整数(一般有限集的讨论见第十二章). 为证明 D 是域，我们只须证明 D 的任意指定的元素 $a\neq 0$ 在 D 中有一个逆元素. 考察所有的乘积

$$ab_1, ab_2, \cdots, ab_n \ (b_1, b_2, \cdots, b_n \text{ 为 } D \text{ 中元素}). \qquad (9)$$

这给出 D 中几个全不相同的元素，因为不然，如果对某 $i\neq j$ 有 $ab_i=ab_j$，则根据消去律，消去 a 留下 $b_i=b_j$，这与假定 $b_i\,(i=1,2,\cdots,n)$ 是不同元素相违背. 因为 D 中的全部元素都列在表(9)中，D 的单位元素 1 也必出现在表中某个位置上，比如 $1=ab_i$，那么相应的元素 b_i 就是所要求的元素 a 的逆元素. 证毕

根据上述证明，为在 $\mathbf{Z}_p$ 中精确地找出逆元素，可以对 $\mathbf{Z}_p$ 中所有可能的数 b_i 进行试验来得到. 逆元素还可以直接算出，这是因为 $\mathbf{Z}_p$ 中方程 $ax=1$(其中 $a\neq 0$)只不过是同余方程 $ax\equiv 1 \pmod p$

(其中 $a\neq0$)的另一种形式,而且后者可以根据 § 1.9 定理 16 所述的欧几里得算法求出整数解 x.

值得注意的是,联立线性方程的整个理论应用到一般域上.例如考虑两个联立方程

$$\begin{aligned} ax+by&=e,\\ cx+dy&=f. \end{aligned} \tag{10}$$

式中字母 $a,\cdots,f$ 表示域 F 的任意元素. 第一个方程乘以 d, 第二个方程乘以 b,然后相减,我们得到 $(ad-bc)x=de-bf$; 第二个方程乘以 a,第一个方程乘以 c,然后相减,得到 $(ad-bc)y=af-ce$,因此,如果我们定义(10)的系数行列式(参见第十章)为

$$\Delta=\begin{vmatrix} a & b\\ c & d \end{vmatrix}=ad-bc,$$

当 $\Delta\neq0$ 时,则方程(10)有解

$$x=\frac{de-bf}{\Delta},\quad y=\frac{af-ce}{\Delta}\quad (\Delta=ad-bc). \tag{10'}$$

而且没有其他解. 但是当 $\Delta=0$ 时,方程(10)或者没有解或者有很多解(后者仅当 $c=ka, d=kb, f=ke$ 时才发生,也就是两个方程是"成比例"的).

高斯(Gauss)消去法 前面消去法的方法可以推广到形为

$$\begin{aligned} &a_{11}x_1+a_{12}x_2+\cdots+a_{1n}x_n=b_1,\\ &a_{21}x_1+a_{22}x_2+\cdots+a_{2n}x_n=b_2,\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ &a_{m1}x_1+a_{m2}x_2+\cdots+a_{mn}x_n=b_m \end{aligned} \tag{11}$$

的 n 个未知数 $x_1,\cdots,x_n$ 的 m 个联立线性方程, 这里不仅已知系数 a_{ij}; b_i,而且未知数 x_i,都被限制在指定的域 F 上. 为求出已知方程组的全部解,我们现在将叙述称为高斯消去法的一般方法,其想法是用简单的方程组代替已知方程组, 这个简单的方程组等价于已

知方程组，即它们是同解方程组.（例如，退化方程 $0\cdot x_1+\cdots+0\cdot x_n=b_i$ 与 $0=b_i$ 等价，而 $0=b_i$ 是不一定能满足的.）

采用缩写记号，我们只写下第 i 个方程，并把它表示成样本项 $a_{ij}x_j$ 对 $j=1,\cdots,n$ 求和，即写成

$$\sum_{j=1}^{n}a_{ij}x_j=b_i,\quad i=1,\cdots,m;\text{所有 } a_{ij}\in F. \tag{11'}$$

我们分两种情况对未知数的个数 n 用归纳法进行论证.

情况 1 每个 $a_{i1}=0$. 那末显然方程组(11′)等价于 $n-1$ 个未知数 $x_2,\cdots,x_n$ 的 m 个方程的一个"较小的"方程组；对于较小的方程组的任何解来说，x_1 是任意的.

情况 2 某一个 $a_{i1}\neq 0$. 通过两个方程的调换（如果必要的话），我们得到等价的方程组，使得 $a_{11}\neq 0$. 当第一个方程乘以 a_{11}^{-1} 时，我们则得到一个等价的方程组，其中 $a_{11}=1$. 然后，依次从第 i 个方程($i=2,\cdots,m$)减去新的第一个方程的 a_{i1} 倍，我们便得到形如

$$\begin{aligned}x_1+a'_{12}x_2+a'_{13}x_3+\cdots+a'_{1n}x_n&=b'_1,\\ a'_{22}x_2+a'_{23}x_3+\cdots+a'_{2n}x_n&=b'_2,\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots&\cdots\cdots\\ a'_{m2}x_2+a'_{m3}x_3+\cdots+a'_{mn}x_n&=b'_m\end{aligned} \tag{12}$$

的等价方程组. 例如，在域 $\mathbf{Z}_{11}$ 上，方程组

$$\begin{aligned}3x+5y+7z&\equiv 6,\\ 5x+9y+6z&\equiv 7,\\ 2x+\ \ y+4z&\equiv 3.\end{aligned}$$

用这个方法将化为

$$\begin{aligned}x+9y+6z&\equiv 2,\\ 8y+9z&\equiv 8,\\ 5y+3z&\equiv 10.\end{aligned}$$

这里所有方程都理解成是模 11 的.

对m用归纳法进行论证，我们得到

定理 9 任意n个未知数m个方程的联立线性方程组(11)可化为一个等价的方程组，这个等价方程组的第i个方程具有形式

$$x_i+c_{i,i+1}x_{i+1}+c_{i,i+2}x_{i+2}+\cdots+c_{in}x_n=d_i, \tag{13}$$

这里i属于$\{1, 2, \cdots, m\}$中r个数组成的某个子集，然后再加上$m-r$个形为$0=d_k$的方程.

证明 如果总是出现情况 2，则我们得到形为(12)的m个方程，并且称原方程组是相容的. 如果出现情况 1，则我们可以得到形为$0=d_k$的一组退化方程. 如果所有的$d_k=0$，则可以不必考虑$0=d_k$的那些方程，如果有一个$d_k\neq0$，则原方程组(11)是不相容的(没有解). 证毕

详细写出方程组(13)如下

$$\begin{aligned}x_1+c_{12}x_2+c_{13}x_3+\cdots+c_{1n}x_n&=d_1,\\ x_2+c_{23}x_3+\cdots+c_{2n}x_n&=d_2,\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots&\\ x_r+\cdots+c_{rn}x_n&=d_r, \qquad (r\leqslant m)\end{aligned}$$

可称为梯形方程组.

任何梯形方程组(13)的解法是容易描述的. 逐次考虑$x_n, x_{n-1}, \cdots, x_1$. 如果在该序列中出现的$x_i$是方程组(13)中某个方程的第一个变量，那么它可通过$x_n, \cdots, x_{i+1}$由下面关系确定出来

$$x_i=d_i-c_{i,i+1}x_{i+1}-c_{i,i+2}x_{i+2}-\cdots-c_{in}x_n. \tag{13'}$$

否则，这个x_i可以取任意值. 这就证明了

推论 在定理 9 所说的相容情况下，(11)的全部解确定如下. 不出现在(13)各式首位的$m-r$个变量x_k可以任意取值（它们是自由变量). 任意选取这些x_k之后，代入(13′)式便可逐步地算出剩下的变量x_i.

在前面举出的具体例子中，首先 $8y+9z\equiv 8 \pmod{11}$ 可化为 $y+8z\equiv 1 \pmod{11}$，这个方程乘以 5 后去减方程 $5y+3z\equiv 10 \pmod{11}$，我们得 $7z\equiv 5 \pmod{11}$，因此 $z\equiv 7 \pmod{11}$. 于是已知方程组的梯形方程组是

$$\left.\begin{aligned} x+9y+6z&\equiv 2\\ y+8z&\equiv 1\\ z&\equiv 7 \end{aligned}\right\} \pmod{11}.$$

我们解得 $y\equiv 1-8z\equiv 0 \pmod{11}$ 和 $x\equiv 2-9y-6z\equiv 4 \pmod{11}$. 将 $x=4, y=0, z=7$ 代入原方程，可以验证它是原方程的解.

如果(11)右边的常数 b_i 全都为零，则称方程组为齐次的. 这类方程组总有(平凡)解 $x_1=x_2=\cdots=x_n=0$. 它可能不存在非平凡解，但是如果变量的个数超过方程的个数，那么方程组(13)的最后一个方程总还包含可任意取值的自由变量. 此外，对于齐次方程组来说，决不会出现可能矛盾的方程 $0=d_i$，因此有

定理 10 n 个变量 m 个方程的齐次线性方程组，当 $m<n$ 时，总有非全为零的解.

习　题

1. 解下列联立同余式:

(a) $\begin{cases} 3x+2y\equiv 1\\ 4x+6y\equiv 3 \end{cases} \pmod 7$;

(b) $\begin{cases} 2x+7y\equiv 3\\ 3x+4z\equiv 6\\ 4x+7y+z\equiv 0 \end{cases} \pmod{11}$;

(c) $\begin{cases} x-2y+z\equiv 5\\ 2x+2y\equiv 7\\ 5x-3y+4z\equiv 1 \end{cases} \pmod{13}$.

2. 删去习题 1(a) 和 (b) 方程中的模，在有理数域 $\mathbf{Q}$ 中求解.

3. 在 $\mathbf{Q}(\sqrt{2})$ 中解联立方程

$$\begin{cases}(1+\sqrt{2})x+(1-\sqrt{2})y=2,\\(2-\sqrt{2})x+(3-\sqrt{2})y=1.\end{cases}$$

4. 求出下列联立同余式的全部非同余解:

$$\begin{cases}x+\ y+\ z\equiv 0\\3x+2y+4z\equiv 0\end{cases}\quad (\text{mod } 5).$$

5. 求出下列联立同余式的全部非同余解:

(a) $$\begin{cases}x+2y-\ z+5t\equiv 4\\2x+5y+\ z+2t\equiv 1\\x+3y+2z+6t\equiv 2\end{cases}\quad (\text{mod } 7);$$

(b) $$\begin{cases}x+\ y+\ z\equiv 1\\3x+3y+3z\equiv 4\end{cases}\quad (\text{mod } 5).$$

6. 证明: 两个方程

$$a_1x_1+\cdots+a_nx_n=c$$
$$b_1x_1+\cdots+b_nx_n=d$$

总有解，这里系数在给定的域中，并假定不存在常数 $k\neq 0$ 和 $m\neq 0$ 使得对于 $i=1,\cdots,n$, 有 $ka_i=mb_i$.

7. 证明: 如果$(x_1,\cdots,x_n)$是齐次线性方程组的任意解，那么$(-x_1,\cdots,-x_n)$是另一个解. 关于这两个解的和能说些什么?

*8. (a) 证明: 三个联立方程

$$ax+by+cz=d,$$
$$a'x+b'y+c'z=d',$$
$$a''x+b''y+c''z=d''$$

在任意域 F 上有唯一解，这里 3×3 行列式

$$\Delta=ab'c''+a'b''c+a''bc'-a''b'c-a'bc''-ab''c'\neq 0.$$

(b) 写出(a)中计算 x 的公式，并用它证明 $x=4$ 是(12)式下面列出的 $\mathbf{Z}_{11}$ 上三个联立线性方程的解.

§2.4 有 序 域

如果域 F 包含"正"元素集合 P, §1.3 中所列的加法律、乘法律和三分律成立，则称域 F 是有序的. 换句话说，当把一个域看作整环时，如果它是一个有序整环，则这个域是有序域. 根据经验知

道，全体有理数就构成这样的有序域，现在我们从构造有理数为整数偶出发来证明这一点，并进一步指出，这种“自然”排序的方法，是把有理数域作成有序域的唯一方法.

首先回忆一下，任何有序整环中，非零元素 b 的平方 b^2 总是正的. 如果商 $\frac{a}{b}$ 是正的，则乘积 $\left(\frac{a}{b}\right)b^2=ab$ 也必为正的，反之亦真. 因此，在任意有序域中，

$$\frac{a}{b}>0 \quad 当且仅当 \quad ab>0, \tag{14}$$

而有理数 (a,b) 的意思是表示商 $\frac{a}{b}$，因此我们定义有理数 (a,b) 是正的当且仅当在 $\mathbf{Z}$ 中乘积 ab 是正的.

定理 11 如果定义 $(a,b)>0$ 意味着整数 ab 是正的，则全体有理数构成一个有序域.

证明 我们按前面的习惯定义了相等之后，必须证明与正元素相等的元素是正的：由 $(a,b)>0$ 和 $(a,b)\equiv(c,d)$ 推出 $(c,d)>0$. 这是正确的，因为 cd 与 b^2cd 同号，ab 与 abd^2 同号，根据假设 $ad=bc$，有 $abd^2=b^2cd$. 所需的加法律、乘法律和三分律也成立. 例如，两个正的数偶 (a,b) 与 (c,d) 的和是正的，这是因为，由 $ab>0$ 和 $cd>0$ 推出 $d^2ab>0$ 和 $b^2cd>0$，因此

$$bd(ad+bc)=d^2ab+b^2cd>0,$$

这就是说，和 $(ad+bc,bd)$ 是正的. 最后，分数“正”元素的定义同表示整数的特殊分数 $(a,1)$ 的自然顺序是一致的，这是因为，根据定义 (14)，只有当 $a\cdot1>0$ 时，$(a,1)$ 才是正的. 证毕

因为定理 11 的证明中只用到“全体整数是有序整环”的假定，所以它实际上建立了下面更一般的结果：

定理 12 在约定“D 的元素 a,b 的商是正的当且仅当 ab 是正的”之下，有序整环 D 的商域 $Q(D)$ 是有序的. 只有按这种方法可

以扩张D的次序使Q成为有序域.

存在很多其他有序域：实数域，形为$a+b\sqrt{2}$的域$\mathbf{Q}(\sqrt{2})$（见§2.1）和实数域的其他子域，在任何这样的域中，绝对值可按§1.3那样定义，在那里所建立的不等式的性质在这里同样成立. 在任何有序域上，除任意有序整环上成立的法则之外，我们还可以证明，

$$0<\frac{1}{a} \text{ 当且仅当 } a>0, \tag{15}$$

$$\frac{a}{b}<\frac{c}{d} \text{ 当且仅当 } abd^2<b^2cd, \tag{16}$$

$$\text{由 } 0<a<b \text{ 可推出 } 0<\frac{1}{b}<\frac{1}{a}, \tag{17}$$

$$\text{由 } a<b<0 \text{ 可推出 } 0>\frac{1}{a}>\frac{1}{b}, \tag{18}$$

$$a_1^2+a_2^2+\cdots+a_n^2\geqslant 0. \tag{19}$$

(17)和(18)两个法则在不等式除法中是常见的. 法则(19)，即平方和永远非负（§1.3定理2），是特别有用的. 例如，若$a\neq b$，则$(a-b)^2>0$，于是$a^2-2ab+b^2>0$，由此得出$a^2+b^2>2ab$. 由此令$x=a^2$，$y=b^2$，并且两边除以2，那么

$$\frac{x+y}{2}>\sqrt{xy}\quad(x\neq y).$$

这表明，两个不同实数的算术平均值大于几何平均值$\sqrt{xy}$.

习　题

1. 假定全体整数构成一个有序整环，证明两个正有理数的乘积是正的.

2. 类似地证明：设D是有序整环，如果$(a,\ b)\neq 0$，那么$(a,\ b)>0$和$-(a,b)>0$两种情况中，恰有一种情况在$Q(D)$中成立.

3. 证明

$$|xx'+yy'|\leqslant\sqrt{(x^2+y^2)(x'^2+y'^2)}$$

在任何有序域中成立，该域中所有正元素都有平方根.（提示：两边平方.）

4. 证明正文中的公式(15)～(19).

5. 设 n 为正整数，a 和 b 为正有理数，证明$\frac{a^n+b^n}{2}\geqslant\left(\frac{a+b}{2}\right)^n$.（提示：令$\frac{a+b}{2}=r$，$d=\frac{a-b}{2}$，$a=r+d$，$b=r-d$.）

6. (a) 证明：任何有序域的子域是有序域.

(b) 有序域的任何子整环是有序整环吗？

7. 对全体有理数(或者更一般地，在任何有序域中)证明：如果 $a<b$，则存在无穷多个 x 满足 $a<x<b$.

8. 证明：有序域中，正元素不能构成一个良序集.

9. 在算术中常常发生的错误是把$\frac{a}{b}+\frac{a}{c}$计算成$\frac{a}{b+c}$.

(a) 证明：在任何域中，由$\frac{a}{b}+\frac{a}{c}=\frac{a}{b+c}$可推出 $a=0$ 或者 $b^2+bc+c^2=0$.

(b) 证明：在一个有序域中，由它可推出 $a=0$.

*§ 2.5 正整数公设[①]

虽然我们用了全体整数的整环 $\mathbf{Z}$ 作为我们考察基本数系的出发点，但是这一过程实际上很不严格，因为它假定负数存在. 本章余下部分我们将指出怎样仅由我们熟悉的正整数的事实导出负整数及其性质，由此我们指出，负数存在性的假定如何可以避免.

为一致起见，我们从列举所有正整数系 $\mathbf{Z}^+$ 的一些基本性质开始，这些性质容易从第一章的结果推出.

定理 13 $\mathbf{Z}$ 中所有正整数系 $\mathbf{Z}^+$，具有下列性质：

(i) 在所定义的加法和乘法二元运算之下，$\mathbf{Z}^+$ 是封闭的，这两个运算满足结合律、交换律和分配律.

(ii) 在 $\mathbf{Z}^+$ 中存在乘法单位元素 1，适合对 $\mathbf{Z}^+$ 中一切 m 有

① 加"*"号的节可以略去，这并不影响连贯性.

$m\cdot 1=m$.

(iii) 此外，在 $\mathbf{Z}^+$ 中，下面的消去律成立：

$$\text{若 } mx=nx,\text{ 则 } m=n. \tag{20}$$

(iv) 再有，对 $\mathbf{Z}^+$ 中任意两个元素 m 和 n，下面三种可能性中恰有一个成立：或者 $m=n$，或者 $m+x=n$ 在 $\mathbf{Z}^+$ 中有一个解 x，或者 $m=n+y$ 在 $\mathbf{Z}^+$ 中有一个解 y.

(v) 最后，在 $\mathbf{Z}^+$ 中数学归纳法原理成立：$\mathbf{Z}^+$ 的任意子集，如果包含 1，并且当它包含 n 时也包含 $n+1$，那末这个子集包含 $\mathbf{Z}^+$ 中每个元素.

我们把 $\mathbf{Z}^+$ 的这些性质的证明留作习题.

相反地，如果把这个定理中指出的性质(i)～(v)看作公设，在下述意义下，它们完整地描述了正整数：我们先前定义过的正整数系具有这些性质，并且可以证明任何其他满足这些公设的系统与这个正整数系同构. 特别注意，在 $\mathbf{Z}^+$ 中如果 $m+x=n$，那么

$$\begin{aligned} n+z &= (m+x)+z=m+(x+z)\\ &= m+(z+x)=(m+z)+x, \end{aligned}$$

因此，由(iv)知 $m+z=n+z$ 是不可能的. 类似地，$n=m+y$ 同 $m+z=n+z$ 也是不相容的. 因此，第三次利用性质(iv)，我们得到

$$\text{若 } m+z=n+z,\text{ 则 } m=n. \tag{21}$$

而且，方程 $m+x=n$ 的三种可能性代替了正整数系的那些序的性质.

从由这些公设给出的正整数系出发，我们可以重新构造整数系 $\mathbf{Z}$. 构造的目的是为了得到一个比 $\mathbf{Z}^+$ 大的系统，在这个系统中减法总是可能的. 因此，作为新元素，我们引进某正整数偶 (m, n)，这里每个数偶表示方程 $n+x=m$ 的解(如果是解的话). 这个构造的详细过程类似于由整数环构造有理数域(§ 2.2).

定义 一个整数定义为正整数 m 和 n 的一个数偶 (m, n). 数

偶的“相等”按约定定义为

$$(m,n)\equiv(r,s)\text{ 意味着 } m+s=n+r, \tag{22}$$

而和与积分别定义为

$$(m,n)+(r,s)=(m+r,n+s), \tag{23}$$

$$(m,n)\cdot(r,s)=(mr+ns,ms+nr). \tag{24}$$

最后，(m,n)是“正”的当且仅当对某正整数 x 有 $n+x=m$.

由这些定义引进的数偶实际上满足我们已给出的所有关于整数的公设. 我们首先必须验证，由(22)引进的“相等”满足自反律、对称律和传递律. 在这个相等意义下，分别由(23)和(24)给出的和与积是唯一确定的. 把定义(23)和(24)系统地应用到整环的各种形式的定律上，那么这些定律对于数偶也成立，这同有理数的讨论几乎一样. 特别，对刚刚定义的系统，(2, 1)是单位元素，(1, 1)是零元素，并且加法逆元素存在，这是因为

$$(m,n)+(n,m)\equiv(1,1),\text{ 对所有 }(m,n).$$

数偶的乘法消去律证起来较难些，证明时用到定理 13 的条件(iv). 证明完消去律之后，我们就知道全体数偶构成整环.

由定理 13 的公设(iv)，每个数偶恰好可写成下面三种形式之一：(m,m)，$(n+x,n)$，$(m,m+x)$. 第一种形式的那些数偶等于零元素(1, 1)；第二种形式的数偶$(n+x,n)$是正的数偶. 并且可以证明，数偶具有有序整环的定义(§ 1.3)中所要求的加法律、乘法律和三分律. 此外，

$$(m+x,m)\equiv(n+y,n)\quad\text{当且仅当}\quad x=y.$$

因此，如果把“同余”的数偶实际上看成同一偶，那么对应 $x\mapsto(n+x,n)$是从全体给定的正整数 x 的集合到全体新的正数偶$(n+x,n)$的集合的一个单射. 它甚至是一个单一同态，这因为由定义(23)和(24)，

$$(m+x,m)+(n+y,n)=(m+n+x+y,m+n),$$

$+x, m)\cdot(n+y, n)$

$$=(mn+my+nx+mn+xy, mn+nx+mn+my).$$

因此新的"正"数偶满足数学归纳法原理. 于是我们就粗略地给出了下面结果的一个证明.

定理 14 通过定义 $\mathbf{Z}$ 的任意元素为 $\mathbf{Z}^+$ 中两个正整数之差这种方式，正整数系 $\mathbf{Z}^+$ 可以嵌入较大的系统 $\mathbf{Z}$ 中，在 $\mathbf{Z}$ 中减法是可能的. 这样构造的系统 $\mathbf{Z}$ 是一个有序整环，它的正元素满足数学归纳法原理.

由 §1.5 习题 8，这个结果蕴含着良序原则. 值得注意的是，上面粗略的证明只涉及到 $\mathbf{Z}^+$ 的公设，反过来，在包含 $\mathbf{Z}^+$ 的任意整环中，$\mathbf{Z}^+$ 的元素之差 $(a-b)$ 必须满足定义 (22)～(24)（参见 §1.2 习题 5）. 这就证明了

定理 15 包含系统 $\mathbf{Z}^+$ 的任意整环包含一个与整数环 $\mathbf{Z}$ 同构的子整环.

习　题

1. 证明：由(22)定义的关系满足自反律、对称律和传递律.
2. 证明：如果 $(m, n)\equiv(m', n')$，则对所有的 (r, s) 有
$$(m, n)+(r, s)\equiv(m', n')+(r, s),$$
和 $$(m, n)\cdot(r, s)\equiv(m', n')\cdot(r, s).$$
3. 证明：由(23)定义的"加法"满足交换律和结合律.
4. 证明：由(24)定义的"乘法"满足交换律和结合律.
5. 证明：对所有的 m, (m, m) 是同一个元素，并且是加法零元素. 证明第一个命题可由第二个命题推出.
6. 证明：$(m+1, m)$ 是乘法单位元素.
7. 证明分配律.
8. 证明乘法消去律.
9. 习题 1～8 中用到 $\mathbf{Z}^+$ 哪些性质？象由定理 5 得出定理 7 那样，叙述一个与定理 14 和定理 15 有关的定理.

10. 证明：对于数偶(m, n)"正性"的任何不同于(24)式后面一段叙述的定义，定理 14 都不成立.

11. 详细证明定理 13.

*12. 证明：定理 13 的公设(iv)，可以用条件"对 $\mathbf{Z}^+$ 中每个 $m, m+1\neq 1$"来代替.（这实质上是皮亚诺(Peano)公设(iii)，如定理 16 所述.）

13. 在 $\mathbf{Z}^+$ 中定义 $m<n$ 意味着对某个 $x\in\mathbf{Z}^+$ 有 $m+x=n$. 证明：

(a) 由 $m<n$ 和 $n<r$ 可推出 $m<r$.

(b) 不存在 m 使 $m<m$ 成立.

(c) 由 $m<n$ 可推出对所有的 r, $m+r<n+r$.

(d) 由 $m<n$ 可推出对所有的 r, $mr<nr$.

*14. 证明：习题 13 的结论(c)和(d)可以用来代替 $\mathbf{Z}^+$ 的公设中的消去律(20)和(21).

15. 证明：由 $\mathbf{Z}^+$ 得到 $\mathbf{Z}$ 所用的方法并不能产生 $\mathbf{Z}$ 的新扩张. 你能推广这个结果吗？

*§ 2.6 皮亚诺公设

在正整数集合 $P=\mathbf{Z}^+$ 上，如果把加法和乘法当作未定义的运算，我们可以用后继函数

$$S(n)=n+1 \tag{25}$$

来定义它们.

定理 16 正整数集合 P 和后继函数 S 具有下列性质：

(i) $1\in P$;

(ii) 若 $n\in P$, 则 $S(n)\in P$;

(iii) 在 P 中没有一个 n 使 $S(n)=1$;

(iv) 对 P 中 m 和 n, 由 $S(n)=S(m)$ 可推出 $m=n$;

(v) P 的一个子集如果包含 1, 并且当它包含 n 时，也包含 $S(n)$，那么这个子集必等于 P.

证明 这些性质直接从定理 13 得到. 特别注意，(v)是数学归纳法原理.

证毕

1168301

性质(i)～(v)称为正整数集合的皮亚诺公设. 正如下面将要指出的那样，它们足以证明正整数集的所有性质. 我们现在用它们证明，原来的整数公设可确定整数集合(精确到同构).

定理 17 在任意有序整环 D 中，存在唯一的子集 P' 满足关于单位元素 $1'$ 和后继函数 $S'(a)=a+1'$ 的皮亚诺公设.

注 直观地，显然由 $2'=1'+1', 3'=1'+1'+1'$，…定义的序列 $1', 2', 3'$, …就是这样一个子集. 不过，我们希望一个以有序整环公设为依据的正式的证明.

证明 D 的所有正元素的集合 D^+ 显然包含 $1'$，并且满足(i)和(ii). 现在令 Σ 是 D^+ 的所有子集 T 组成的类，而 T 具有 P 中性质(i)和(ii)，我们定义 P' 是所有这些集合 T 的交集，即 $a\in P'$ 当且仅当 a 属于每一个这样的集合 T.

由定义，对于 P'，(i)和(ii)成立. 因为 P' 只包含正元素，所以(iii)成立；因为 $a+1'=b+1'$ 意味着 $a=b$，所以(iv)成立. 为证明(v)，令 A 是 P' 的子集，它包含 1，并且当它包含 a 时也包含 $S(a)$. 那么 A 是前面用到的集合 T 中的一个，于是 P' 包含在 A 中，因此 $P'=A$. 对 P'，这就证明了(v)，同时(v)表明 P' 是唯一可能的这样的集合，因为 P' 满足(i)和(ii).

定理 18 定理 17 的子集 P' 对于加法、乘法和序而言，它同构于正整数集合 P.

注 非正式地，显然 $1\mapsto 1', 2\mapsto 2'$, … 产生所要求的同构. 因为 $1'<1'+1'<1'+1'+1'<\cdots$，所以这个对应将保持次序.

证明 首先，令 $Q(n)$ 是如下命题：P 中整数 $1\leqslant x\leqslant n$ 和 P' 中元素 $\phi_n(x)$ 之间存在唯一的对应 $x\mapsto\phi_n(x)$，在这对应下：

$$\phi_n(1)=1', \phi_n(S(x))=S'(\phi_n(x)), \text{对 } 1\leqslant x<n. \tag{26}$$

显然 $Q(1)$ 成立. 已知 $Q(n)$ 成立，因此有一个 ϕ_n，我们可以通过令

$$\phi_{n+1}(x)=\phi_n(x), \text{对 } 1\leqslant x\leqslant n \text{ 和 } \phi_{n+1}(n+1)=S'(\phi_n(n)),$$

构造唯一的 ϕ_{n+1}，因此由 $Q(n)$ 成立推出 $Q(n+1)$ 成立. 由归纳法这就证明了 $Q(n)$ 成立.

再有，如果 $1\leqslant x\leqslant n<m$，对 x 用归纳法，我们可以证明 $\phi_n(x)=\phi_m(x)$，因此当 $x\leqslant n$ 时，$\phi_n(x)$ 是不依赖于 n 的. 令 $\phi(x)$ 表示 P' 的元素，这就给出 P 到 P' 的对应 $x\mapsto\phi(x)$，它具有性质：

$$\phi(1)=1',\ \phi(S(x))=S'(\phi(x)). \tag{27}$$

P' 的每个元素是 P 的某个元素 x 的对应元素 $\phi(x)$. 因为元素 $\phi(x)$ 的集合包含 $1'$，并且包含任何 $\phi(x)$ 也一定包含 $\phi(x)$ 的后继，因此根据 P' 的性质(v)，这个集合就是整个 P'.

在两个集合 P 和 P' 中，我们有

$$n+1=S(n),\qquad n+S(m)=S(n+m), \tag{28}$$

$$n\cdot 1=n,\qquad n\cdot S(m)=n\cdot m+n. \tag{29}$$

从这些方程和(27)式，对 m 用归纳法，我们可以容易地证明

$$\phi(n+m)=\phi(n)+\phi(m)$$

和
$$\phi(n\cdot m)=\phi(n)\cdot\phi(m).$$

换句话说，ϕ 关于加法和乘法是一个同构.

其次，ϕ 保留次序，即由 $m<n$ 可推出 $\phi(m)<\phi(n)$. 实际上，由定义，$m<n$ 意味着 $n-m$ 是正的，即

$$m<n\quad 当且仅当\quad n=m+k,\ 对 P 中某个 k. \tag{30}$$

因此由 $m<n$ 得出 $n=m+k$，所以 $\phi(n)=\phi(m)+\phi(k)$. 因为 $\phi(k)$ 在 D 中是正的，所以这就证明了 $\phi(m)<\phi(n)$，正如所要求的那样.

最后，ϕ 是 P 到 P' 的双射. 因为我们已经知道，$\phi(x)$ 的集合包含整个 P'，所以只须证明，由 $n\neq m$ 可推出 $\phi(n)\neq\phi(m)$. 但是，$n\neq m$ 的意思是，比如说是 $m<n$，于是 $\phi(m)<\phi(n)$，因此

$$\phi(n)\neq\phi(m).$$

为概括我们的结论，我们定义两个有序整环之间的序-同构，

即保留次序的同构. 鉴于定理 15, 我们从定理 18 得出下列推论:

推论 1 任意有序整环包含一个与 $\mathbf{Z}$ 序-同构的子整环.

这个结果同定理 6 和定理 7 结合起来, 我们有

推论 2 任意有序域包含一个与有理数域 $\mathbf{Q}$ 序-同构的子域.

这个结果给出作为最小有序域的有理数域的一个抽象特征.

最后, 在 D 中全体正元素集合是良序的情况下, 可以容易地证明, 定理 17 的集合 P' 是由 D 的所有正元素组成. 这就证明了:

推论 3 在序-同构意义下, 只存在一个有序整环 $\mathbf{Z}$, 它的正元素构成良序集合.

这就证明了, 在同构意义下, 整数公设唯一地确定整数集合.

可以不从良序整环公设开始论述整数集合, 而是从皮亚诺公设开始. 其要点是注意到可用递归方程(28)和(29)定义完备的加法表和乘法表. 同定理 15 的证明中几乎一样, 我们可以正式地证明存在唯一的满足(28)的二元运算——加法, 类似地, 存在唯一的满足(29)的乘法. 那么定理 13 中列举的各种性质可用归纳法证明. 然后, 从皮亚诺公设出发, § 2.5 中给出的数偶构造产生全体整数.

习 题

在下列习题中, 只假定皮亚诺公设, 并由(28)和(29)定义了加法和乘法.

1. 用归纳法证明 $n+1=1+n$.
2. 利用习题 1 证明, 加法满足交换律.
3. 证明: 加法满足结合律.
4. 证明: 乘法满足结合律.
5. 证明: 分配律成立.

第三章　多 项 式

§3.1　多项式形式

设D为任意整环，设x是较大的整环E的任意元素，D作为E的子整环包含在E中．在E中，我们能作x同D的元素或同x本身的和、差与积．

反复进行这些运算，明显得到下面形式的一切表达式

$$a_0+a_1x+\cdots+a_nx^n \quad (a_0, \cdots, a_n\in D; a_n\neq 0, \text{当 } n>0), \tag{1}$$

这里x^n(n为任意整数)定义为n个因子的乘积$xx\cdots x$．而反过来，只用整环公设，我们可对形为(1)的任意两个表达式进行加、减与乘，得到第三个这样的表达式．例如，如果D是整数环，则根据一般分配律、交换律和结合律，有

$$\begin{aligned}f(x)&=(0+1\cdot x+(-2)x^2)(2+3\cdot x)\\&=0\cdot 2+0\cdot 3\cdot x+1\cdot x\cdot 2+1\cdot x\cdot 3\cdot x\\&\quad+(-2)x^2\cdot 2+(-2)x^2\cdot 3\cdot x\\&=0+0\cdot x+2x+3x^2+(-4)x^2+(-6)x^3\\&=0+(0+2)x+(3+(-4))x^2+(-6)x^3\\&=0+2x+(-1)x^2+(-6)x^3.\end{aligned}$$

这个论证可以一般化．事实上，设

$$p(x)=a_0+a_1x+\cdots+a_mx^m$$

和　$$q(x)=b_0+b_1x+\cdots+b_nx^n$$

是形为(1)的任意两个表达式．如果$m>n$，那么我们有

$$\begin{aligned}p(x)\pm q(x)=(a_0\pm b_0)+\cdots+(a_n\pm b_n)x^n+a_{n+1}x^{n+1}\\+\cdots+a_mx^m.\end{aligned} \tag{2}$$

如果 $m<n$，可得出类似的公式．再有，根据分配律，

$$p(x)q(x)=\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}a_ib_jx^{i+j},$$

然后把指数相同的项集中在一起，并将系数相加，我们有

$$p(x)q(x)=a_0b_0+(a_0b_1+a_1b_0)x+\cdots+a_mb_nx^{m+n}. \qquad (3)$$

在这个公式中，x^k 的系数显然是和

$$\sum_i a_ib_{k-i},$$

这里是对满足 $0\leqslant i\leqslant m$ 和 $0\leqslant k-i\leqslant n$ 的所有 i 求和，见图 1.

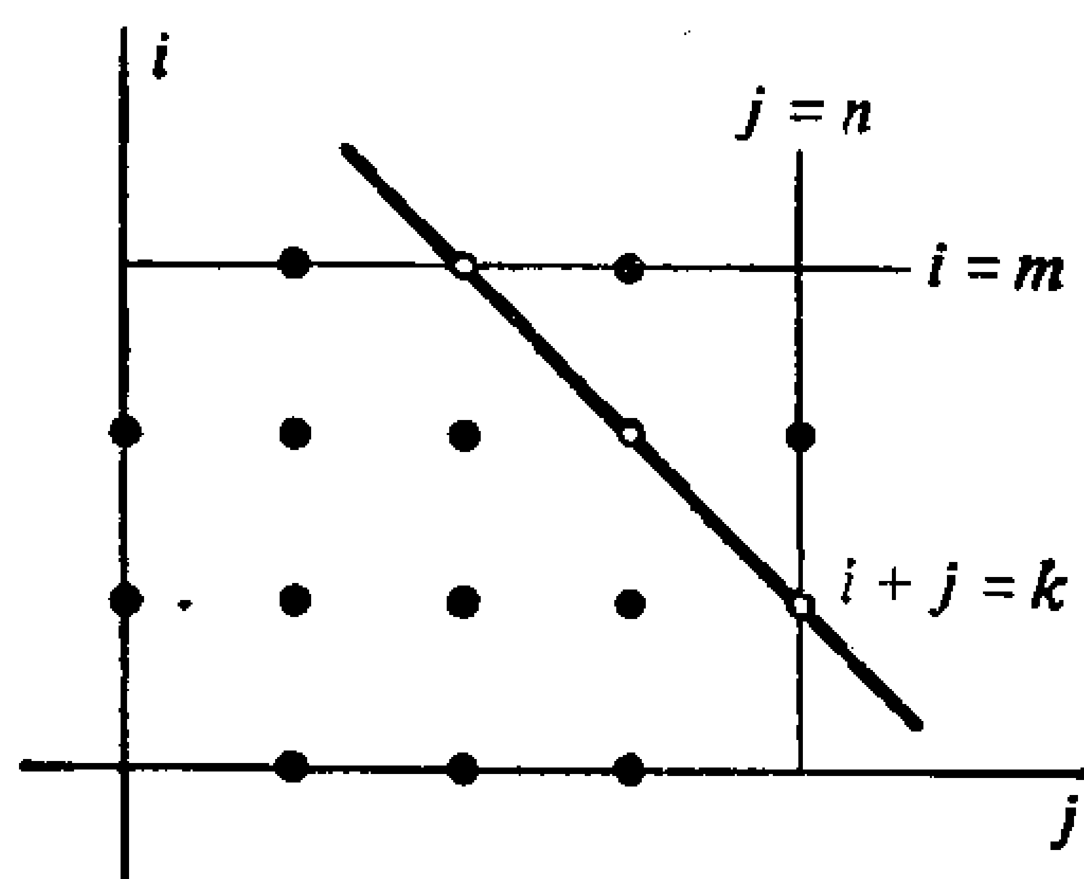


图 1

于是我们就证明了下面的结果：

定理 1 假设存在一个整环 E，包含一个与给定整环 D 同构的子整环，并有元素 x 不在 D 中．那么关于这个元素 x 的多项式(1)根据公式(2)和(3)相加、相减和相乘，构成 E 的子整环．

为了证明这样的整环 E 总是存在的，需要建立下面的定义．

定义 整环 D 上关于 x 的多项式是指形为 (1) 的表达式．整数 n 称为多项式 (1) 的次数．两个多项式相等是指它们具有相同的次数，而且对应的系数都相等．

因为关于符号 x 没有给出什么假定，所以表达式(1)也常称为多项式形式 (这里把它同多项式函数加以区别，见 §3.2)，符号 x 本身称为未定元．

定理2 如果加法和乘法分别由公式(2)和(3)定义，那么整环D上关于x的全体不同的多项式形式构成一个包含D在内的新整环$D[x]$.

证明 由公式(3)推出没有零因子(乘法消去律)，这是因为，两个非零多项式形式乘积的首项系数$a_m b_n$是它相应因子的非零首项系数a_m和b_n的乘积(非零的). 0和1的性质及加法逆元素的存在性不难从公式(2)和(3)得出.

为了证明交换律、结合律和分配律，引进"哑"零系数是方便的，这使(2)和(3)变成简单形式

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k + \sum_{k=0}^{\infty} b_k x^k = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k + b_k) x^k, \tag{2'}$$

$$\left(\sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k\right)\left(\sum_{k=0}^{\infty} b_k x^k\right) = \sum_{k=0}^{\infty}\left(\sum_{i+j=k} a_i b_j x^k\right), \tag{3'}$$

这里除了有限多个系数外全都是零. 那么任何一个定律，比如分配律，只要把定律的两边按照法则(2′)和(3′)乘起来就可以验证，这因为，

$$\left(\sum_k a_k x^k\right)\left(\sum_k b_k x^k + \sum_k c_k x^k\right) = \sum_k \left[\sum_{i+j=k} a_i (b_j + c_j)\right] x^k,$$

$$\left(\sum_k a_k x^k\right)\left(\sum_k b_k x^k\right) + \left(\sum_k a_k x^k\right)\left(\sum_k c_k x^k\right) = \sum_k \left[\left(\sum_{i+j=k} a_i b_j\right) + \left(\sum_{i+j=k} a_i c_j\right)\right] x^k,$$

并证明这两个等式右边的x的每个幂x^k的系数相等. 根据整环D的分配律，两个表达式中x的k次幂的系数是相同的. 类似的论证可证其余定律，从而完成定理2的其他证明.

现在回忆一下§2.2的定理7，我们会看到，如果我们定义D

上关于未定元 x 的有理形式为带有非零分母多项式形式的形式商

$$\frac{p(x)}{q(x)}=\frac{a_0+a_1x+\cdots+a_mx^m}{b_0+b_1x+\cdots+b_nx^n}$$

$$(a_i, b_j 在 D 中; a_m\neq 0, 当\ m>0; b_n\neq 0),$$

并由 § 2.2的定义(5),(6)和(7)来分别定义有理形式的相等、加法和乘法，这样我们便可得到一个域.

推论 任意整环 D 上关于未定元 x 的有理形式构成一个域. 这个域记作 $D(x)$.

习 题

1. 把下列各式化成形式(1):

$x^2-5x(3x+7)^2$,

$(x^2+5x-4)(x^2-2x+3)$,

$\left(3x^2+7x-\frac{1}{2}\right)\left(x^3-\frac{x}{2}+1\right)$.

2. 类似习题 1, 计算 $(3x^3+5x-4)(4x^3-x+3)$, 其中系数是 mod7 的整数.

3. x^3+5x-4 是(1)的形式吗? 把它化成形式(1). 把

$$(1+x+2x^2+3x^3)-(0+x+x^2+3x^3)$$

化成形式(1), 指出每一步用什么公设.

4. (a) $\frac{1}{2}+3\cdot x^{\frac{1}{2}}+5x$ 是有理数域上的多项式形式吗?

(b) 在系数属于 $\mathbf{Z}_5$ 的多项式形式整环上, 为什么 $x^3\cdot x^4$ 不等于 x^2?

5. 讨论下列命题:

(a) 两个多项式形式乘积的次数等于这两个因子的次数之和.

(b) 两个多项式形式之和的次数等于被加数的次数较大者.

6. 证明: 在 $D[x]$ 中, 加法结合律和乘法结合律成立.

7. $p(x)=a_0+a_1x+\cdots+a_nx^n$ 的"形式导数"定义为 $p'(x)=a_1+2a_2x+\cdots+na_nx^{n-1}$. 证明: 在任意整环上:

(a) $(cp)'=cp'$ (c 为常数),

(b) $(p+q)'=p'+q'$,

(c) $(pq)'=pq'+p'q$,

(d) $(p^n)'=np^{n-1}p'$.

*8. 设 $p(y)$ 和 $q(x)$ 分别是关于未定元 y 和 x 的多项式形式，证明：把 $y=q(x)$ 代入 $p(y)$，产生一个多项式 $p(q(x))$. 根据习题 7 中定义的形式导数，证明：$[p(q(x))]'=p'(q(x))q'(x)$.

*9. 对于给定的整环 D 指出，怎样构造由关于符号 t 的全体“形式”的无穷幂级数 $a_0+a_1t+a_2t^2+\cdots$(其中系数 a_i 在 D 中)组成的整环 $D\{t\}$.

*10. (a) 设 D 为一个有序整环，证明：如果规定多项式形式 $p(x)>0$ 是指 $p(x)$ 的第一个非零系数 a_k 是正的(在 D 中)，那么多项式形式(1)构成有序整环 $D[x]$.

(b) 证明：如果我们规定 $p(x)>0$ 是指在形式(1)中 $a_n>0$，那么 $D[x]$ 也是有序整环.

*11. 在习题 10(b) 中，令 $D=\mathbf{Z}$，证明：1 是 $\mathbf{Z}[x]$ 中最小“正”多项式，虽然 $\mathbf{Z}[x]$ 并不满足良序原则.

§3.2 多项式函数

如前所述，设 D 为任意整环，又设

$$f(x)=a_0+a_1x+\cdots+a_mx^m$$

是 D 上关于 x 的任意多项式形式. 如果未定元 x 用一个元素 $c\in D$ 代替，$f(x)$ 就不再是一个虚的表达式，它可以看作 D 中一个确定元素

$$a_0+a_1c+\cdots+a_mc^m.$$

换句话说，如果 x 被看作在微积分学的意义下的一个独立变量，而不是看作 D 外面的抽象符号，那么 $f(x)$ 就成为普通的函数：“如果 x 已知(值为 c)，那么 $f(x)$ 就被确定了(值为 $f(c)$)”. 我们把它抽象化，一般地定义变量在 D 上的“函数”f 是一个规则：它给 D 上每个元素 x 确定一个“值”$f(x)$，这个值也在 D 中. 我们定义两个这样的函数相等(记作 $f=g$)当且仅当对所有的 x, $f(x)=g(x)$. 两个函数的和 $h=f+g$，差 $q=f-g$ 及积 $p=fg$ 分别通过对所有的 x

计算 $h(x)=f(x)+g(x)$, $q(x)=f(x)-g(x)$ 和 $p(x)=f(x)g(x)$ 来定义的. 常数函数是取值 b 与 x 无关的函数; 恒等函数是函数 j, 它满足对所有 x, $j(x)=x$.

定义 *多项式函数是可以写成形式(1)的函数.*

因为推导公式(2)和(3)时所用的法则在任何整环中都是成立的, 所以不管未定元 x 取什么值[①] c(在 D 中), 公式(2)和(3)都成立. 也就是说, 它们是恒等式, 因此多项式函数的和与积也可以通过公式(2)和(3)来计算. 正如 §3.3 将要说明的那样, 按 §1.1 的定义, D 上全体多项式函数构成一个交换环.

根据定义, 每个形式(1)都确定一个唯一的多项式函数, 每个多项式函数至少由一个这样的形式来确定. 因此无疑存在一个保持和与积的映射, 它把任意给定整环 D 上的全体多项式形式的集合映射到全体多项式函数的集合. (这样的对应称为映上同态或满同态, 见 §3.3.)

如果可以确定映射是一一的, 我们就知道它是一个同构. 因此, 从抽象代数的观点来看, 我们可以忽略多项式形式与多项式函数之间的差别. 可惜情况并非如此. 事实上, 在模 3 整数域 $\mathbf{Z}_3$ 上, $f(x)=x^3-x$ 和 $g(x)=0$ 这两个不同的形式确定了同一个函数——这个函数恒等于零. 根据费马定理 (§1.9定理 18), 在 $\mathbf{Z}_p$ 上, x^p-x 与 0 是相同的. 因此, 在任意 $\mathbf{Z}_p$ 上, 多项式函数相等实际上不同于多项式形式相等.

我们现在将指出, 在上述例子中, 由于系数所在的整环是有限的, 发生这一事实并不奇怪. 在有理数域上, 我们并不能构造出一个这样的例子. 我们在说明此事之前先回忆一些基本定义. 所谓非零形式(1)的次数, 我们指的是它的最大指数, 即 n. 最高次项 a_nx^n

① 实际上, 通过设"x 为未知量"解方程的根据是: 在 x 上所允许的每个运算, 对于每个可能的 x 值都必须是正确的.

称为它的首项，a_n 称为它的首项系数，如果 $a_n=1$，多项式则称为首一多项式.

定理 3 整环 D 上的一个多项式形式 $r(x)$ 可被 $x-a$ 整除当且仅当 $r(a)=0$.

这里“$r(x)$ 可被 $x-a$ 整除”这句话的意思是 $r(x)=(x-a)\cdot s(x)$，其中 $s(x)$ 是 D 上的某一个多项式形式.

证明 设 $r(x)=c_0+c_1x+\cdots+c_nx^n(c_n\neq 0)$. 对每个 a，由中学代数公式，我们有

$$\sum_{k=0}^{n}c_kx^k-\sum_{k=0}^{n}c_ka^k=\sum_{k=0}^{n}c_k(x^k-a^k)$$
$$=\sum_{k=0}^{n}c_k[(x-a)(x^{k-1}+x^{k-2}a+\cdots+a^{k-1})].$$

因此 $r(x)-r(a)=(x-a)s(x)$，这里 $s(x)$ 是 $n-1$ 次多项式形式. 反之，如果 $r(x)=(x-a)s(x)$ 中用 a 代替 x，则得 $r(a)=0$.

推论 整环 D 上的 n 次多项式 $r(x)$ 在 D 中至多有 n 个零点.

($r(x)$ 的零点是指方程 $r(x)=0$ 的根，即元素 $a\in D$ 使得 $r(a)=0$.)

证明 如果 a 是一个零点，那么根据定理有 $r(x)=(x-a)\cdot s(x)$，其中 $s(x)$ 的次数为 $n-1$. 由归纳法，$s(x)$ 至多有 $n-1$ 个零点，可是根据 §1.2 定理 1 $r(x)=0$ 当且仅当 $x=a$ 或 $s(x)=0$，因此 $r(x)=0$ 至多有 n 个零点.

定理 4 如果整环 D 是无限的，那么 D 上定义同一个函数的两个多项式形式具有相等的系数.

证明 象(1)那样，设 $p(x)$ 和 $q(x)$ 是两个给定的关于未定元 x 的多项式形式. 如果它们确定同一个函数，那么对于 D 中选取的每个元素 a 都有 $p(a)=q(a)$；然而我们所希望的结论则是 $p(x)$ 和 $q(x)$ 的次数相等，对应的系数相同. 如果用差 $r(x)=p(x)-q(x)$

来表示，这就是说，对D中一切a，$r(a)=c_0+c_1a+\cdots+c_na^n=0$ 可推出$c_0=c_1=\cdots=c_n=0$. 这个结论可由定理 3 推出，因为如果系数c_i不全为零，那么，在D中至多有n个x使多项式$r(x)$为零，因为D是无限的，所以还剩下一些x值使$r(x)\neq 0$，这与$r(x)$在D上为零相矛盾.

于是，如果D是无限的，则多项式函数和多项式形式这两个概念是等价的(用代数学的术语就是，多项式函数环同构于多项式形式环).

另一方面，如果D是包含元素$a_1, a_2, \cdots, a_n$的有限整环，则定理 4 一定不成立. 例如，在这种情况下，n次首一多项式形式$(x-a_1)(x-a_2)\cdots(x-a_n)$同形式 0 确定了同一个函数.

因为同构于整环的任意系统本身也是一个整环，所以定理 4 蕴含着下面的推论:

推论 任意无限整环上全体多项式函数构成一个整环.

如果D为无限域，则不同的有理形式确定不同的有理函数，所以D上全体有理函数构成一个域. (留心，一个有理函数不是在一切点上都有定义，只是在那些使分母不为零的点上才有定义. 因此，如果D是一个域，那么除有限个点外的全部点上它是有定义的.)

我们常常希望找出一个次数最小的多项式$p(x)$，使它在域F中的$n+1$个已知点$a_0, a_1, \cdots, a_n$上分别取F中给定的值$y_0, y_1, \cdots, y_n$，即

$$p(a_i)=y_i\,(i=0, 1, \cdots, n;\ a_i\neq a_j,\ \text{当}\ i\neq j). \tag{4}$$

这称为多项式插值问题.

为了解决这个问题，考虑多项式

$$q_i(x)=\prod_{j\neq i}(x-a_j)$$

$$=(x-a_0)\cdots(x-a_{i-1})(x-a_{i+1})\cdots(x-a_n).$$

显然当 $j\neq i$, $q_i(a_j)=0$, 而

$$C_i=q_i(a_i)=\prod_{j\neq i}(a_i-a_j)\neq 0.$$

因此 C_i^{-1} 存在. 并且下面这个次数为 n 或低于 n 的多项式

$$p(x)=\sum_{i=0}^{n}C_i^{-1}y_iq_i(x)=\sum_{i=0}^{n}\frac{y_i\prod_{j\neq i}(x-a_j)}{\prod_{j\neq i}(a_i-a_j)} \tag{5}$$

满足方程(4). 公式(5)称为拉格朗日(Lagrange)插值公式.

由定理 3 知, 至多有一个 n 次或低于 n 次的多项式能够满足方程(4): 因为两个这样的多项式之差有 $n+1$ 个零点, 于是它必为零多项式形式. 这就证明了下面的结果:

定理 5 存在一个而且只存在一个 n 次或低于 n 次的多项式形式, 在 $n+1$ 个不同点上取给定的值.

习 题

1. 在整环 $\mathbf{Z}_5$ 上找出另一个多项式形式同 x^2-x+1 确定同一个函数.

2. 证明: x^2-1 在 $\mathbf{Z}_{15}$ 上有四个零点. 为什么这与定理 3 的推论不矛盾?

3. 证明: 如果 $a_0=a_1-h$, $a_2=a_1+h$, $1+1\neq 0$, 那么(4)式当 $n=2$ 时的解可由抛物线插值公式

$$p(x)=y_1+\frac{1}{2}(y_2-y_1)\left(\frac{x-a_1}{h}\right)+\frac{1}{2}(y_2-2y_1+y_0)\left(\frac{x-a_1}{h}\right)^2$$

给出.

4. 用以下方法求满足 $f(0)=0$, $f(1)=1$, $f(2)=0$, $f(3)=1$ 的三次多项式 $f(x)=a+bx+cx^2+dx^3$. 把 a, b, c, d 当作四个方程的未知数, 其中最后一个方程是 $a+3b+9c+27d=1$. (这就是待定系数法.)

5. 用插值公式(5)证明: 任何有限域(如 $\mathbf{Z}_p$) 上的每个函数等于某个多项式函数.

*6. 设 D 是具有 n 个元素 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 的有限整环, 又设 $m(x)$ 表示固定

的多项式形式$(x-a_1)\cdots(x-a_n)$.

(a) 证明：如果两个多项式形式$f(x)$和$g(x)$确定同一个函数，那么$m(x)$是形式$f(x)-g(x)$的因子.

(b) 对整环$\mathbf{Z}_3$和$\mathbf{Z}_5$求出$m(x)$.

(c) 证明：在$D=\mathbf{Z}_p$的情况下，$m(x)=x^p-x$.（提示：用费马定理.）

7. 证明：在一个无限域上，确定同一个函数的不同的有理形式在§2.2的意义下，它们形式上是相等的.

8. (a) 设D和D'是同构的整环，证明$D[x]$与$D'[y]$同构，这里$D[x]$和$D'[y]$分别是D和D'上关于未定元x和y的多项式形式的整环.

(b) 关于$D(x)$和$D'(y)$有什么结论？

9. 设Q是整环D的商域（§2.2定理4），证明：域$D(x)$与域$Q(x)$同构.

§3.3 交换环的同态

设D为任意给定的整环，又设$D\langle x\rangle$表示D上的多项式函数集合. 对所有$x\in D$, $f(x)+g(x)=g(x)+f(x)$, $0+f(x)=f(x)$, $1\cdot f(x)=f(x)$，等等. 因此，加法和乘法满足交换律、结合律和分配律；加法和乘法的单位元素存在；并且加法逆元素存在. 概括起来，$D\langle x\rangle$除乘法消去律外满足整环的所有公设. 当D为有限整环时，消去律不成立，这因为存在非零因子的乘积$(x-a_1)\cdot(x-a_2)\cdots(x-a_n)$为零.

换句话说，在§1.1的定义下，$D\langle x\rangle$是一个交换环. 为方便起见，我们在此重述这个定义.

定义 交换环在称为加法和乘法的两种二元运算之下封闭的集合，这两种运算满足交换律和结合律，并且进一步有

(i) 满足乘法对加法的分配律；

(ii) 存在加法单位元素（零）0，并且存在加法逆元素；

(iii) 存在乘法单位元素1①.

① 一些作者在定义交换环时去掉条件(iii). 非交换环将在第十三章讨论.

回忆一下，我们已经证明了§1.2所列的法则1～9对任意交换环都成立. 另外，§1.10的定理19构造了一类有趣的有限交换环 $\mathbf{Z}_m$.

任意整环 D 上的全体函数构成的系统 D^*，为我们提供了另一个交换环的例子，这里加法和乘法象§3.2里那样定义. 甚至于定义在无限整环 D 上的全体函数集合 D^* 中也存在零因子. 例如，如果 D 为任意有序整环，我们定义 $f(x)=|x|+x, g(x)=|x|-x$，那么 $f\cdot g=h$, $h(x)=|x|^2-x^2=0$，对一切 x 成立. 但是 $f\neq 0, g\neq 0$. 另一方面，D^* 具有整环定义中所有其他性质. 我们只要在每步证明的右边简单写上"对一切 x"，根据 D 的定律便可得到 D^* 的相应定律的证明. 例如，$f(x)+g(x)=g(x)+f(x)$ 对一切 x，这就意味着 $f+g=g+f$. 再有，如果我们定义 e 为一个常数函数，即 $e(x)=1$ 对一切 x，那么 $e(x)f(x)=1\cdot f(x)=f(x)$ 对一切 x 和 f，因此 $ef=f$，对一切 f，于是 e 是 D^* 的乘法单位元素.（想一想乘法消去律为什么不能按这种方法证明.）因为上面没有一处用到乘法消去律，所以我们可以断言：

引理1 任意交换环 A 上的全体函数构成一个交换环.

现在让我们定义交换环 A 的子环（类似于子整环）为 A 的这样的子集：如果它包含任意两个元素 f 和 g，则它包含 $f\pm g$ 和 fg，并且还包含着 A 的单位元素.

由定理1，任意整环 D 上多项式函数集合 $D\langle x\rangle$，(i) 它是 D 上所有函数环 D^* 的子环，(ii)它包含所有常数函数和恒等函数，(iii)它包含在任何其他满足(ii)的 D^* 的子环之中. 按这种意义 $D\langle x\rangle$ 是由常数函数和恒等函数生成的 D^* 的子环. 这给出多项式函数概念的一个简单的代数特征.

下面将同构的概念一般化，可以更深刻地认识交换环.

定义 一个函数 $\phi: a\mapsto a\phi$，它把交换环 R 映射到交换环 R'，

ϕ 称为同态当且仅当它满足下列条件：对所有 $a, b\in R$, 有

$$(a+b)\phi=a\phi+b\phi, \tag{6}$$

$$(ab)\phi=(a\phi)(b\phi), \tag{7}$$

并且把 R 的单位元素映射到 R' 的单位元素.

这些条件表明，同态保持加法和乘法. 它们是按照 § 1.11 和 § 1.12 中简洁的记号写出来，其中 $a\phi$ 表示用 ϕ 变换 a. 如果我们写 $\phi(a)$ 代替 $a\phi$, 则(6)和(7)分别变成 $\phi(a+b)=\phi(a)+\phi(b)$ 和 $\phi(ab)=\phi(a)\phi(b)$. 显然，一个同构恰是一个双射的同态.

我们容易验证，从 n 到包含 n 的剩余类(对任意固定模 m)的函数是一个同态 $\mathbf{Z}\to\mathbf{Z}_m$, 它把整数环 $\mathbf{Z}$ 映上 § 1.10 定理 19 的环 $\mathbf{Z}_m$. 我们现在证明另一个容易的结果.

引理 2 设 ϕ 是从交换环 R 到交换环 R' 的同态，那么 0ϕ 是 R' 的零元素，并且对所有 $a, b\in R$ 有 $(a-b)\phi=a\phi-b\phi$.

证明 由(6)式，$0\phi=(0+0)\phi=0\phi+0\phi$, 这就证明了 0ϕ 是 R' 中的零元素. 类似地，如果 $x=a-b$ 在 R 中，那么 $b+x=a$, 并且 $a\phi=(b+x)\phi=b\phi+x\phi$, 于是 $x\phi=a\phi-b\phi$ 在 R' 中.

定理 6 从任意整环 D 上的多项式形式整环 $D[x]$ 到 D 上多项式函数环 $D\langle x\rangle$ 的对应 $p(x)\mapsto f(x)$ 是一个同态.

证明 对 D 中任意元素 x, 在 D 中元素 $p(x)$ 和 $q(x)$ 的加法和乘法必须遵循恒等式(2)和(3)，因为在 § 3.1 中这些恒等式的推导只用到整环公设.

定理 4 的结果指出，如果 D 是无限的，那么定理 6 的同态就是一个同构.

习　题

1. (a) 证明：在域 $\mathbf{Z}_2$ 上只存在四个不同的函数，并写出这个函数环的加法表和乘法表.

(b) 把这些函数中的每一个表示成多项式函数.

(c) 这个函数环与模 4 整数环同构吗?

2. 在模 n 整数环 $\mathbf{Z}_n$ 上有多少不同的函数?

3. 下列函数集合是含有单位元素的交换环吗?

(a) 整环 D 上满足 $f(0)=0$ 的所有函数 f.

(b) 整环 D 上满足 $f(0)=f(1)$的所有函数 f.

(c) 整环 D 上满足 $f(0)\neq 0$ 的所有函数 f.

(d) $\mathbf{Q}$ 上 ($\mathbf{Q}$ 为有理数域) 满足 $-7\leqslant f(x)\leqslant 7$(对一切 x) 的所有函数 f.

(e) $\mathbf{Q}$ 上满足 $f(x+1)=f(x)$(对一切 x)的所有函数 f(这样的函数是周期的).

4. 在习题 3 的那些例子之外, 再构造两个函数交换环.

5. 设 D^* 如课文里所定义的, 证明: D^* 中的加法与乘法的结合律成立.

6. (a) 设 D 和 D' 是同构的整环, 证明: $D\langle x\rangle$和 $D'\langle x\rangle$也是同构的.

(b) 对于 D^* 和 D'^* 有什么结论?

7. 证明: 我们不能把 $\mathbf{Z}_p$ 上所有多项式函数的环 $\mathbf{Z}_p\langle x\rangle$嵌入一个域中.

8. 证明: 如果同态 ϕ 把交换环 R 映上交换环 R', 那么 R 的单位元素通过 ϕ 映射到 R' 的单位元素.

9. 证明: 如果 $\phi: R\to R'$ 是环的任意同态, 那么 R 中那些映成 R' 的零元素的元素构成的集合 K 是 R 的一个子环.

*§ 3.4 多元多项式

§ 3.1～§ 3.3 的讨论只涉及到单变量(未定元)x 的多项式. 但是很多结果不难推广到多变量(未定元)$x_1, \cdots, x_n$ 的情形.

定义 整环 D 上关于未定元 $x_1, \cdots, x_n$ 的多项式形式可递推地定义为整环 $D[x_1, \cdots, x_{n-1}]$上关于变量 x_n 的多项式形式, 而 $D[x_1, \cdots, x_{n-1}]$是 D 上关于变量 $x_1, \cdots, x_{n-1}$ 的多项式形式组成的整环(简单地说, $D[x_1, \cdots, x_n]=D[x_1, \cdots, x_{n-1}][x_n]$). 整环 D 上关于变量 $x_1, \cdots, x_n$ 的多项式函数是由常数函数 $f(x_1, \cdots, x_n)=c$ 和 n 个恒等

函数 $f_i(x_1, \cdots, x_n)=x_i(i=1, \cdots, n)$ 通过加法、减法和乘法构造出来的.

例如,在两个变量 x, y 的情况下,

$$p(x, y)=(3+x^2)+0\cdot y+(2x-x^3)y^2$$

是一个这样的形式——通常把它写成更顺的形式

$$3+x^2+2xy^2-x^3y^2.$$

根据定理 4 对 n 用归纳法得

定理 7 如果 D 是无限的,那么 D 上关于变量 $x_1, \cdots, x_n$ 的每个多项式函数可按一种且只有一种方法表示为多项式形式. 不管 D 是无限的还是有限的, $D[x_1, \cdots, x_n]$ 是一个整环.

从定义明显看出,变量下标的每个置换,引导出关于 $D\langle x_1, \cdots, x_n\rangle$ 的一个自然的自同构,其中 $D\langle x_1, \cdots, x_n\rangle$ 是 n 个变量多项式函数的交换环. 如果 D 是无限的,由定理 7 得到,上述结论对多项式形式也是正确的(这些定义对于变量不是对称的). 现在我们证明,这个结论对任意整环 D 都是正确的.

定理 8 变量下标的每个置换,引导出 $D[x_1, \cdots, x_n]$ 上的不同自同构.

证明 考虑两个未定元 x, y 的情况. $D[y, x]$ 的每个形式

$$p(y, x)=\sum_i\Big(\sum_j a_{ij}y^j\Big)x^i,$$

可以根据 $D[y, x]$ 中的分配律、交换律和结合律重新排列得出一个形为

$$p(y, x)=\sum_j\Big(\sum_i a_{ij}x^i\Big)y^j$$

的表达式. 根据这个表达式的形式,似乎可以把它解释为整环 $D[x, y]$ (先 x 后 y) 中的多项式 $p'(x, y)$. 这样建立的对应 $p(y, x)\mapsto p'(x, y)$ 是一对一的——每个非零元素 a_{ij} 的有限集合恰好对应

$D[y,x]$ 中一个元素，也恰好对应 $D[x,y]$ 中一个元素. 最后，因加法和乘法的法则(2)和(3)可以从整环的公设推出，而 $D[y,x]$ 和 $D[x,y]$ 这两个是整环，所以我们看到这个对应保持了和与积.

n 个未定元的情况可以用更复杂更一般的记号类似地处理，或者从两个变量的情况出发用归纳法推导出.

于是 $D[x_1,\cdots,x_n]$ 事实上对称地依赖于 $x_1,\cdots,x_n$. 这就启发我们构造一种 $D[x_1,\cdots,x_n]$ 的定义，从这定义对称性是一目了然的. 在 $n=2$ 情况下对于整环 $D''=D[x,y]$，可以粗略地说明如下. 第一，D'' 是由 x,y 和 D 的元素生成的(D'' 的每个元素可以由 x,y 和 D 的元素反复进行求和与求积运算而得). 第二，生成元 x 和 y 是 D 上并立未定元(或者是在 D 上代数独立的). 这就意味着，系数 a_{ij} 在 D 上的有限和 $\sum_{i,j} a_{ij}x^i y^j$ 可以为零当且仅当所有系数全为零. 这两个性质以对称的方式(见下面的习题 9)唯一确定整环 $D[x,y]$.

习　题

1. 把下列各式表示成系数在 $D[x]$ 上关于 y 的多项式:

   (a) $p(x,y)=y^3x+(x^2-xy)^2$,

   (b) $q(x,y)=(x+y)^3-3yx(x^2+x-1)$.

2. 计算整环 $\mathbf{Z}_2$ 上关于两个变量 x,y 的所有可能的函数的数目.

3. 重写下列表达式为关于 x 的多项式，其系数是关于 y 的多项式(象定理 8 的证明中那样):

$$(3x^2+2x+1)y^3+(x^4+2)y^2+(2x-3)y+x^4-3x^2+2x.$$

4. 设 D 为任意整环，证明：把 $p(x)$ 映射到 $p(-x)$ 的对应是 $D[x]$ 的一个自同构. 它也是 $D\langle x\rangle$ 的自同构吗?

5. 对应 $p(x)\mapsto p(x+c)$ (此处 c 为常数)是 $D[x]$ 的自同构吗? 用数的例子加以说明.

6. 设 F 为域，证明：对任意常数 $a\neq 0$，对应 $p(x)\mapsto p(ax)$ 是 $F[x]$ 的一

个自同构.

7. 除了定理 8 中所叙述的外，列出 $D[x,y]$上的自同构.

8. 证明定理 7:

(a) 对 $n=2$, (b) 对任意 n.

9. (a) 详细证明: 整环 $D[x, y]$(先 x 后 y)确实是由两个并立未定元 x 和 y 在 D 上生成的.

(b) 设 D' 和 D'' 是两个整环，它们分别是由两个并立未定元 x', y' 和 x'', y'' 在 D 上生成的，证明: 在"x' 映射到 x'', y' 映射到 y'', D 的每个元素映射到它自身"的对应之下，D' 和 D'' 同构.

(c) 对 $n=2$, 利用(a)和(b)两部分给出定理 8 一个另外的证明.

§3.5 辗转相除法

多项式辗转相除法(有时称为"多项式长除法")为下面多项式相除提供了一个标准形式: 用一个多项式 $a(x)$去除另一个多项式 $b(x)$以便得到商式 $q(x)$和余式 $r(x)$, $r(x)$的次数低于除式$a(x)$的次数. 我们现在将证明，这个辗转相除法，虽然通常是在有理系数多项式上进行的，但实际上对于系数在任意域上的多项式都是可行的.

定理 9 如果 F 为任意域, $a(x)\neq 0$ 和 $b(x)$ 是 F 上的任意多项式，那么我们可以找到 F 上的多项式 $q(x)$和 $r(x)$, 使得

$$b(x)=q(x)a(x)+r(x) \tag{8}$$

成立，这里 $r(x)$或者为零或者它的次数低于 $a(x)$的次数.

证明概要 从 $b(x)$ 中减去除式 $a(x)$ 与适当的单项式 cx^k的乘积，逐步消去被除式 $b(x)$的最高项. 如果 $a(x)=a_0+a_1x+\cdots+a_mx^m$ $(a_m\neq 0)$, $b(x)=b_0+b_1x+\cdots+b_nx^n$ $(b_n\neq 0)$, 并且 $b(x)$的次数 n 不低于 $a(x)$的次数 m, 则我们可以做差

$$b_1(x)=b(x)-\frac{b_n}{a_m}x^{n-m}a(x)$$

$$=0\cdot x^n+\left(b_{n-1}-\frac{a_{m-1}b_n}{a_m}\right)x^{n-1}+\cdots, \tag{9}$$

$b_1(x)$的次数低于 n 或者为零. 然后我们可以重复这一过程直到余式的次数低于 m 为止.

辗转相除法的正式证明可以根据数学归纳法第二原理, 如 § 1.5 中所描述的那样. 设 m 是 $a(x)$的次数. 任何次数 $n<m$ 的多项式 $b(x)$可表示成 $b(x)=0\cdot a(x)+b(x)$, 其商式 $q(x)=0$. 对次数 $n\geqslant m$ 的多项式, 由(9)式得到

$$b(x)=b_1(x)+\frac{b_n}{a_m}x^{n-m}a(x), \tag{10}$$

其中 $b_1(x)$的次数 $k<n$, 除非 $b_1(x)=0$, 由数学归纳法第二原理我们可以假定, 表达式(8)对于一切次数 $k<n$ 的多项式都成立, 于是我们有

$$b_1(x)=q_1(x)a(x)+r(x), \tag{11}$$

这里 $r(x)$的次数低于 m, 除非 $r(x)=0$. 把(11)式代入(10)式中, 我们得到所要求的方程(8)

$$b(x)=\left[q_1(x)+\frac{b_n}{a_m}x^{n-m}\right]a(x)+r(x).$$

特别是, 如果多项式 $a(x)=x-c$ 是线性首一的, 那么(8)中的余式是一个常数 $r=b(x)-(x-c)q(x)$, 如果我们令 $x=c$, 这个方程给出 $r=b(c)-0q(c)=b(c)$. 因此我们有

推论 1 用 $x-c$ 去除多项式 $p(x)$, 其余数是 $p(c)$. (称为余数定理)

当(8)中的余式是零时, 我们就称 $b(x)$可被 $a(x)$整除. 更确切地说, 如果 $a(x)$和 $b(x)$是整环 D 上的两个多项式形式, 那么, 在 D 上 (或在 $D[x]$中) $b(x)$可被 $a(x)$整除当且仅当存在某个多项式形式 $q(x)\in D[x]$, 使得 $b(x)=q(x)a(x)$.

习　题

1. 证明：在(8)式中对于给定的 $a(x)$ 和 $b(x)$，$q(x)$和 $r(x)$是唯一的.

2. 设 $b(x)=x^5-x^3+3x-5$，$a(x)=x^2+7$，计算 $q(x)$和 $r(x)$.

3. 设 $a(x)$分别为 $x-2$，$x+2$，x^3+x-1，$b(x)$同习题 2 一样，计算 $q(x)$和 $r(x)$.

4. (a) 对域 $\mathbf{Z}_5$ 做习题 2.

   (b) 对域 $\mathbf{Z}_3$ 做习题 3.

5. 在域 F 中给出不同的数 $a_0, a_1, \cdots, a_n$，令 $a(x)=\prod_{j=0}^{n}(x-a_j)$. 证明：$F$ 上任意多项式 $f(x)$被 $a(x)$除所得的余式 $r(x)$，确是 $f(x)$在这些点上的拉格朗日插值.

6. 在 $\mathbf{Z}_3$，$\mathbf{Z}_5$，$\mathbf{Z}_7$ 中任何一个整环上 x^3+x^2+x+1 可被 x^2+3x+2 整除吗？

7. 找出所有可能的环 $\mathbf{Z}_n$，在其上 $x^5-10x+12$ 可被 x^2+2 整除.

8. (a) 设一个任意整环上多项式 $f(x)$ 有 $f(a)=0=f(b)$，其中 $a\neq b$，证明：$f(x)$可被$(x-a)(x-b)$整除.

   (b) 推广这个结果.

9. 在应用数学归纳法第二原理证明辗转相除法时，$P(n)$ (见 § 1.5)确切的含义是什么？

§ 3.6　单位与相伴

我们可以得到关于多项式的完全类似于算术基本定理的定理(或称为唯一因子分解定理). 在这个类比中，"不可约多项式"扮演素数的角色，它的定义如下.

定义　一个多项式形式如果它可以分解出系数在 F 上次数较低的多项式因子，则称它为 F 上可约多项式；否则称它为 F 上不可约多项式.

例如，多项式 x^2+4 在有理数域上是不可约的. 如果不然，$x^2+4=(x+a)(x+b)$. 令 $x=-b$ 代入上式得$(-b)^2+4=(-b+a)$

$(-b+b)=0$，因此 $(-b)^2=-4$. 这显然是不可能的，因为在这个域中一个数的平方不可能是负的. 因为在任意有序域中，同样的论证也成立，所以我们得出结论：在实数域或其他任意有序域上，x^2+4 也是不可约的.

为了阐明不可约多项式和素数之间的类似，我们现在对任意整环 D 来定义某些整除性的概念，例如对多项式环 $\mathbf{Q}[x]$，整数环 $\mathbf{Z}$，或者别的整环来定义.

D 的元素 a 可被 b *整除*（记作 $b|a$）的定义是，在 D 中存在某个 c，使 $a=cb$. 如果 $b|a$ 而且 $a|b$，则称两个元素 a 和 b 是*相伴*. 单位元素 1 的相伴称为*单位*. 因为对一切 a，有 $1|a$，所以 u 是 D 中的单位当且仅当它在 D 中有乘法逆元素 u^{-1}，使得 $1=uu^{-1}$. 具有这个性质的元素也称为*可逆元素*.

如果 a 和 b 是相伴，$a=cb$ 并且 $b=c'a$，因此 $a=cc'a$. 由消去律得 $1=cc'$，于是 c 和 c' 都是单位. 反过来，如果 u 是单位，则 $a=ub$ 是 b 的相伴. 因此两个元素是相伴当且仅当其中每一个可以从另外一个乘以单位因子而得到.

例 1 在域中，每个 $a\neq 0$ 都是单位.

例 2 在整数环 $\mathbf{Z}$ 中，单位只有 ± 1，因此任何 a 的相伴是 $\pm a$.

例 3 在未定元 x 的多项式环 $D[x]$ 中，乘积 $f(x)\cdot g(x)$ 的次数是这两个因子的次数之和. 因此任何元素 $b(x)$ 如果有多项式逆（即 $a(x)b(x)=1$），它必须是零次多项式 $b(x)=b$. 这样常数多项式 b 有逆仅当 b 在 D 中有逆. 因此 $D[x]$ 的单位都是 D 的单位.

如果 F 是域，那么多项式环 $F[x]$ 的单位恰是 F 的非零常数，因此两个多项式 $f(x)$ 和 $g(x)$ 在 $F[x]$ 中相伴当且仅当每一个是另外一个的常数倍.

例 4 在一切数 $a+b\sqrt{2}$（a, b 为整数）构成的整环 $\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$

中，由$(a+b\sqrt{2})(x+y\sqrt{2})=1$得出$x=\dfrac{a}{a^2-2b^2}$，$y=-\dfrac{b}{a^2-2b^2}$——这些都是整数当且仅当$a^2-2b^2=\pm 1$. 于是$1\pm\sqrt{2}$和$3\pm 2\sqrt{2}$是$\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$中的单位，而$2+\sqrt{2}$不是$\mathbf{Z}[\sqrt{2}]$中的单位.

任意整环D的元素b可被它的一切相伴整除，还可被一切单位整除. 这些相伴和单位称为b的“假因子”. 不是单位也不具有真因子的元素称为D中*素元素*或称它在D中是*不可约的*.

例5 在任意域F上，线性多项式$ax+b(a\neq 0)$是不可约的，这是因为它的因子只是常数(单位)或是它本身的常数倍(相伴).

例6 考虑“高斯整数”环$\mathbf{Z}[\sqrt{-1}]$，它是由所有形为$a+b\sqrt{-1}$(其中$a, b\in\mathbf{Z}$)的数组成. 如果$a+b\sqrt{-1}$是单位，那么对某个$c+d\sqrt{-1}$，我们有

$$\begin{aligned}1&=(a+b\sqrt{-1})(c+d\sqrt{-1})\\&=(ac-bd)+(ad+bc)\sqrt{-1}.\end{aligned}$$

因此$ac-bd=1$，$ad+bc=0$，并容易验证

$$1=(ac-bd)^2+(ad+bc)^2=(a^2+b^2)(c^2+d^2).$$

因为a^2+b^2，c^2+d^2都是非负整数，所以我们推断$a^2+b^2=c^2+d^2=1$；于是只可能是：$1, -1, \sqrt{-1}$和$-\sqrt{-1}$给出四个单位.

引理 *在任意整环D中，关系“a和b是相伴”是一个等价关系.*

证明将留给读者(还见下面的习题1～3).

习　题

1. 在任意整环D中，证明：
   (a) 关系“$b|a$”满足自反律和传递律.
   (b) 如果$c\neq 0$，那么$b|a$当且仅当$bc|ac$.
   (c) 任意两个元素有公因子和公倍数.
   (d) 如果$a|b$和$a|c$，那么$a|(b\pm c)$.

2. 证明：$\mathbf{Z}_m$ 的单位都是与 m 互素的整数.

3. 在任意整环中，设“$a\sim b$”的含意是“a 和 b 相伴”，证明：

(a) 如果 $a\sim b$，那么 $c\sim a$ 当且仅当 $c|b$.

(b) 如果 $a\sim b$，那么 $a|c$ 当且仅当 $b|c$.

(c) 如果 $a|c$ 当且仅当 $b|c$，那么 $a\sim b$.

(d) 如果 p 为素元素并且 $p\sim q$，那么 q 也是素元素.

4. 证明：如果 $a\sim a'$ 且 $b\sim b'$，那么 $ab\sim a'b'$. 而一般来说，$a+b\sim a'+b'$ 是不对的.

5. 证明广义消去律：如果 $ax\sim by$，$a\sim b$ 并且 $a\neq 0$，那么 $x\sim y$.

6. 列出 x^2+2x-1 在 $\mathbf{Z}_5[x]$ 中的所有相伴.

7. 找出两个未定元的多项式环 $D[x,y]$ 中的全部单位来.

8. 对于整环 D 中哪些元素 a，使得对应 $p(x)\to p(ax)$ 是 $D[x]$ 的自同构？

9. 找出整环 D 中的全部单位，这里 D 是由所有有理数 $\dfrac{m}{n}$ 组成，其中 m 和 n 为整数，并且 n 不能被 7 整除.

10. 当 $\alpha=a+b\sqrt{3}$，定义 $N(\alpha)=a^2-3b^2$，证明：

(a) $N(\alpha\alpha')=N(\alpha)N(\alpha')$.

(b) 如果 α 是 $\mathbf{Z}[\sqrt{3}]$ 中的单位，那么 $N(\alpha)=\pm 1$.

11. 设 $\mathbf{Z}[\sqrt{5}]$ 是由一切数 $\alpha=a+b\sqrt{5}$ (a, b 为整数)组成的整环，且令 $N(\alpha)=a^2-5b^2$.

(a) 证明：$9+4\sqrt{5}$ 是这个整环中的单位(参见习题 10).

(b) 证明：$1-\sqrt{5}$ 和 $3+\sqrt{5}$ 是相伴，但不是单位.

(c) 证明：一般地，α 是单位当且仅当 $N(\alpha)=\pm 1$.

(d) 设 $N(\alpha)$ 是 $\mathbf{Z}$ 中的素元素，证明：α 是 $\mathbf{Z}[\sqrt{5}]$ 的素元素.

(e) 证明：$4+\sqrt{5}$ 和 $4-\sqrt{5}$ 是素元素.

(f) 证明：2 和 $3+\sqrt{5}$ 是素元素.（提示：对任何 $x\in\mathbf{Z}$，$x^2\equiv 2 \pmod 5$ 是不可能的.）

(g) 利用 $2\cdot 2=(3+\sqrt{5})(3-\sqrt{5})$ 证明：$\mathbf{Z}[\sqrt{5}]$ 不是唯一因子分解整环(见 §3.9).

12. 详细证明正文中的引理.

§3.7 不可约多项式

多项式代数中的一个基本问题是寻求判断给定域上多项式可约性有效方法，这种判断自然完全依赖于所考虑的域 F. 例如，在复数域 $\mathbf{C}$ 上，多项式 x^2+1 分解为 $x^2+1=(x+\sqrt{-1})\cdot(x-\sqrt{-1})$. 事实上，正如 §5.3 中将要指出的，$\mathbf{C}[x]$ 中只有线性多项式是不可约的. 而 x^2+1 在实数域 $\mathbf{R}$ 上是不可约的.

再有，因为 $x^2-28=(x-\sqrt{28})(x+\sqrt{28})$，所以多项式 x^2-28 在实数域上是可约的. 但是，这个多项式在有理数域上是不可约的. 后面我们将严格证明它.

引理 一个二次或三次多项式 $p(x)$ 在域 F 上是不可约的，除非对某个 $c\in F$，有 $p(c)=0$.

证明 把 $p(x)$ 任意分解成次数较低的多项式，其中一个因子必是线性的，这因为多项式乘积的次数等于全体因子的次数之和.

定理 10 设 $p(x)=a_0x^n+a_1x^{n-1}+\cdots+a_n$ 是整系数多项式. 方程 $p(x)=0$ 的任何有理根 $\frac{r}{s}$ 必满足 $r|a_n$ 和 $s|a_0$.

证明 假设对某个分数 $x=\frac{b}{c}$ 满足 $p(x)=0$. 约掉 b 和 c 的最大公因子后，我们可以把 $\frac{b}{c}$ 表示成两个互素整数 r 和 s 的商 $\frac{r}{s}$，把它代入 $p(x)$ 得

$$0=s^n p\left(\frac{r}{s}\right)=a_0r^n+a_1r^{n-1}s+\cdots+a_ns^n, \tag{12}$$

因此

$$-a_0r^n=s(a_1r^{n-1}+a_2r^{n-2}s+\cdots+a_ns^{n-1}),$$

所以 $s|a_0r^n$. 但是 $(s, r)=1$，因此逐次应用 §1.7 定理 10 得 $s|a_0r^{n-1}$, …, $s|a_0$. 类似地，因为

$$-a_n s^n = r(a_0 r^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s^{n-1}),$$

所以有 $r \mid a_n$.

推论 整系数首一多项式的任意有理根都是整数.

现在容易证明 x^2-28 在$\mathbf{Q}$上是不可约的. 根据推论,$x^2=28$意味着$x=\dfrac{r}{s}$是一个整数. 但是, 当 $|x|\geqslant 6$ 时 $x^2-28>0$, 当 $|x|\leqslant 5$ 时 $x^2-28<0$, 因此没有一个整数可能是 $x^2-28=0$ 的根, 所以(由引理)x^2-28 在有理数域上是不可约的.

有理数域 $\mathbf{Q}$ 上多项式的不可约性的一般判别法 (容易的) 是没有的(特殊情形的判别见 §3.10).

习　题

1. 检验下列方程是否有有理根:

(a) $3x^3-7x=5$, (b) $5x^3+x^2+x=4$,

(c) $8x^5+3x^2=17$, (d) $6x^3-3x=18$.

2. 证明: $30x^n=91$(整数 $n>1$) 没有有理根. (提示: 利用算术基本定理.)

3. 对哪些有理数 x, $3x^2-7x$ 为一整数? 找出充分必要条件.

4. 0 和 250 之间有哪些整数 a, 使得对于某个 $n>1$ 方程 $30x^n=a$ 有有理根?

5. x^2+1 在 $\mathbf{Z}_3$ 上是不可约的吗? 在 $\mathbf{Z}_5$ 上呢? 对 x^3+x+2 结果如何?

6. 找出有限域使得

(a) x^2-2 在其上是可约的.

(b) x^2-2 在其上是不可约的.

7. 找出域 $\mathbf{Z}_5$ 上所有二次首一不可约多项式.

8. 找出域 $\mathbf{Z}_3$ 上所有三次首一不可约多项式.

9. 证明: 如果 $a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_nx^n$ 是不可约的, 那么 $a_n+a_{n-1}x+\cdots+a_0x^n$ 也是不可约的.

10. 分别在下列各个域上, 把多项式 x^4-5x^2+6 分解成不可约因子之积:

(a) 有理数域上.

(b) §2.1 的域 $\mathbf{Q}(\sqrt{2})$ 上.

(c) 实数域上.

*11. 证明: 如果 $4ac>b^2$, 那么 ax^2+bx+c 在任何有序域上是不可约的.

§3.8 唯一因子分解定理

整个这一节中我们将研究整环 $F[x]$ 上的因子分解, $F[x]$ 是由域 F 上关于未定元 x 的多项式形式组成. 主要结果是: 因子分解(分解成不可约(素)因子)是唯一的. 其证明类似于算术基本定理(第一章), 实际上是形式上的重复. 这个类比包含着下面基本概念, 这个概念将在第十三章里作系统讨论.

定义 交换环 R 的非空子集 C 称为理想是指 C 满足: 由 $a\in C$ 和 $b\in C$ 可推出 $a\pm b\in C$, 由 $a\in C$ 和 $r\in R$ 可推出 $ra\in C$.

注 对任意 $a\in R$, a 的所有倍数 ra 的集合是一个理想, 这因为对 $r, s\in R$ 有

$$ra\pm sa=(r\pm s)a \quad 和 \quad s(ra)=(sr)a.$$

这样的理想称为主理想. 我们将指出, 任何 $F[x]$ 中的所有理想都是主理想.

定理 11 在任何域 F 上, $F[x]$ 的任何理想 C, (i) 或者仅由零组成, (ii) 或者由任何次数最低的非零元素 $a(x)$ 的倍数 $q(x)a(x)$ 的集合组成.

证明 如果 $C\neq\{0\}$, 则 C 包含一个次数最低的非零多项式 $a(x)$, 其次数记作 $d(a)$, C 还包含 $a(x)$ 的所有倍数 $q(x)a(x)$. 这种情况下, 如果 $b(x)$ 是 C 的任一多项式, 则根据定理 9, 有某个 $r(x)=b(x)-q(x)a(x)$ 的次数小于 $d(a)$. 但是根据假设, C 包含 $r(x)$, 由 C 的构造知 C 不包含次数小于 $d(a)$ 的非零多项式, 因此 $r(x)=0$, 所以 $b(x)=q(x)a(x)$. 这就证明了定理.

现在设 $a(x)$ 和 $b(x)$ 是任意两个多项式, 考虑以任意多项式

$s(x)$和 $t(x)$作为系数的 $a(x)$和 $b(x)$所有“线性组合” $s(x)a(x)+t(x)b(x)$构成的集合 C. 这个集合 C 显然是非空的，并且包含着该集元素的任意和、差或倍数，这是因为(用缩写记号)

$$(sa+tb)\pm(s'a+t'b)=(s\pm s')a+(t\pm t')b,$$

$$q(sa+tb)=(qs)a+(qt)b.$$

因此集合 C 是一个理想，根据定理 11，它是由某个次数最低的多项式 $d(x)$的倍数组成.

这个多项式 $d(x)$ 将整除 $a(x)=1\cdot a(x)+0\cdot b(x)$ 和 $b(x)=0\cdot a(x)+1\cdot b(x)$，并且可被 $a(x)$和 $b(x)$的任意公因子整除，这因为 $d(x)=s_0(x)a(x)+t_0(x)b(x)$. 我们的结论是

定理 12 在 $F[x]$ 中，任意两个多项式 a 和 b 具有最大公因子 d 满足(i)$d|a$ 和 $d|b$，(i′)由 $c|a$ 和 $c|b$ 可推出 $c|d$，并且(ii)d 是 a 和 b 的“线性组合”$d=sa+tb$.

我们注意，可用 § 1.7 中详细描述的欧几里得算法，由 a 和 b 明确地计算出 d.（这就是上面辗转相除法可用来明显地计算多项式的余数的原因.）

还有，如果 d 满足(i)，(i′)和(ii)，那么 d 的一切相伴也满足(i)，(i′)和(ii). 附带一句，由(i)和(ii)可推出(i′).

最大公因子 $d(x)$除单位因子外是唯一的. 这因为，如果 d 和 d' 都是多项式 a 和 b 的最大公因子，那么由(i)和(i′)，有 $d|d'$ 和 $d'|d$，因此 d 和 d' 确是相伴. 反之，如果 d 是最大公因子，那么 d 的每个相伴也是最大公因子. 有时为方便起见，把与 d 相伴的唯一的首一多项式说成最大公因子.

两个多项式 $a(x)$和 $b(x)$，如果它们的最大公因子是单位及其相伴，则称它们*互素*. 这就意味着多项式互素当且仅当它们的公因子只能是 F 的非零常数(整环 $F[x]$的单位).

定理 13 如果 $p(x)$是不可约的，则由 $p(x)|a(x)b(x)$可推出

$p(x)|a(x)$ 或者 $p(x)|b(x)$.

证明 因为 $p(x)$ 是不可约的，所以 $p(x)$ 和 $a(x)$ 的最大公因子或者是 $p(x)$ 或者是单位元素 1. 在前一种情况，有 $p(x)|a(x)$，在后一种情况，我们可写

$$1=s(x)p(x)+t(x)a(x),$$

因此

$$b(x)=1\cdot b(x)=s(x)p(x)b(x)+t(x)[a(x)b(x)].$$

因为 $p(x)$ 整除乘积 $a(x)b(x)$，所以 $p(x)$ 整除上式右边两项，因此整除 $b(x)$. 正如定理所要求的那样.

定理 14 *$F[x]$ 中任意非常数多项式 $a(x)$ 可表示成一个常数 c 乘以某些首一不可约多项式的乘积. 这种表示除因子出现的次序外是唯一的.*

证明 首先，这样的因子分解是可能的. 如果 $a(x)$ 是常数或不可约，那么定理显然成立. 否则，$a(x)$ 是低次多项式的乘积 $a(x)=b(x)b'(x)$. 根据数学归纳法第二原理，我们可以假定

$$b(x)=cp_1(x)\cdots p_m(x),$$

$$b'(x)=c'p_1'(x)\cdots p_n'(x),$$

因此

$$a(x)=(cc')p_1(x)\cdots p_m(x)p_1'(x)\cdots p_n'(x),$$

这里 cc' 是一常数，$p_i(x)$ 和 $p_j'(x)$ 是首一不可约多项式.

为了证明唯一性，假设 $a(x)$ 可能有两个这样的"素"因子分解

$$a(x)=cp_1(x)\cdots p_m(x)=c'q_1(x)\cdots q_n(x).$$

显然 $c=c'$ 是 $a(x)$ 的首项系数(因为 $a(x)$ 的首项系数是其因子首项系数之积). 再有，因为 $p_i(x)$ 整除 $c'q_1(x)\cdots q_n(x)=a(x)$，所以根据定理 13 它必整除某个(非常数)因子 $q_i(x)$；因为 $q_i(x)$ 是不可约的，所以商式 $\frac{q_i(x)}{p_1(x)}$ 必为常数；又因 $p_1(x)$ 和 $q_i(x)$ 都是首一

多项式，所以常数必为 1. 因此 $p_1(x)=q_i(x)$. 消去之后，$p_2(x)\cdots p_m(x)$等于 $q_k(k\neq i)$的乘积，并且乘积的次数低于 $a(x)$的次数. 因此再根据数学归纳法第二原理，$p_j(x)(j\neq 1)$与 $q_k(k\neq i)$成对地分别相等，这就完成了证明.

一个推论是(参考 §1.8 最后一段)，作为 $a(x)$的因子而出现的每个首一不可约多项式 $p_i(x)$ 的指数 e_i 是由 $a(x)$唯一确定的，并且它是使得$[p_i(x)]^e|a(x)$的最大的 e.

如果象定理 14 那样，多项式 $a(x)$ 分解成不可约因子 $p_i(x)$的积，但 $p_i(x)$不必是首一多项式，那么，这些因子不再是唯一的了. 然而，每个因子 $p_i(x)$被它的首项系数来除而得出唯一的首一不可约因子，因此在 $F[x]$上 $p_i(x)$是这个不可约因子的相伴. 所以，任意两个这样的因子分解只要重新排序，并由适当的相伴因子代替每个因子，就可做到彼此一致. 综上所述，$F[x]$ 中的多项式的因子分解，除了相差次序和单位因子外(或者说除了相差次序和用相伴因子替换外)是唯一的.

习　题

1. 证明：如果 ϕ 是由交换环 R 到交换环 R' 的任意一个同态，那么 R' 的加法零元素的原象构成 R 中的一个理想.

2. (a) 求出 x^3-1 和 $x^4+x^3+2x^2+x+1$ 的最大公因子.

   (b) 把最大公因子表示成已知多项式的线性组合 $d(x)=s(x)a(x)+t(x)b(x)$. (注意，系数不一定是整数.)

   (c) 对 $x^{18}-1$ 和 $x^{33}-1$ 做(a)和(b).

3. 求出 $2x^3+6x^2-x-3$ 和 $x^4+4x^3+3x^2+x+1$ 的最大公因子.

4. 假定多项式的系数是在 $\mathbf{Z}_3$ 中，做习题 3.

5. 证明：x^3+x+1 是模 5 不可约.

6. 在 $\mathbf{Z}_3$ 中对下列多项式进行因子分解：

   (a) x^2+x+1,　　(b) x^3+x+2,

   (c) $2x^3+2x^2+x+1$,　　(d) x^4+x^3+x+1,

*(e) x^4+x^3+x+2.

7. 在有理系数多项式环中列出 x^4-1 的全部因子（相伴除外）. 证明：x^4-1 的每个因子与你所列出的某个因子相伴.

8. 分别对 x^6-1 和 x^8-1 做习题 7.

9. 证明：$\mathbf{Z}$ 上两个多项式形式 $q(x)$ 和 $r(x)$ 表示 $\mathbf{Z}_p$ 上同一个函数当且仅当

$$(x^p-x)\mid[q(x)-r(x)].$$

(提示：利用 § 3.2 习题 6.)

10. 证明：域上多项式的任意有限集合有一个最大公因子，它是已知集合中所有多项式的线性组合.

11. (a) 证明：域上任意两个已知多项式的所有公倍数组成的集合是一个理想.

(b) 证明：多项式有最小公倍数；通过求 x^2+3x+2 和 $(x+1)^2$ 的最小公倍数加以说明.

12. 设给定 F 上的多项式 $p(x)$ 具有性质：$p(x)\mid a(x)b(x)$，总可以推出或者 $p(x)\mid a(x)$ 或者 $p(x)\mid b(x)$，证明 $p(x)$ 在 F 上是不可约的.

13. 证明：如果已知多项式 $p(x)$ 适合：任何其他多项式或者与 $p(x)$ 互素或者可被 $p(x)$ 整除，那么 $p(x)$ 是不可约的.

14. 设 $m(x)$ 是不可约多项式的幂，证明：由 $m(x)\mid a(x)b(x)$ 可推出或者 $m(x)\mid a(x)$，或者对某个 e，有 $m(x)\mid(b(x))^e$.

15. 设 $h(x)$ 与 $f(x)$、$g(x)$ 两个多项式互素，证明：$h(x)$ 与 $f(x)g(x)$ 互素.

16. 证明：如果 $h(x)$ 与 $f(x)$ 互素，并且 $h(x)\mid f(x)g(x)$，则 $h(x)\mid g(x)$.

17. 证明：如果 $f(x)$ 和 $g(x)$ 是 $F[x]$ 中互素的多项式，并且 F 是 K 的子域，那么 $f(x)$ 和 $g(x)$ 在 $K[x]$ 中也是互素的.

*18. 证明：如果两个有理系数多项式具有公共实根，那么它们具有非常数公因子（也是有理系数多项式）.

19. 下面给出有理系数多项式的某些集合. 这些集合中哪一些是理想？当集合是理想时，找出该集合中次数最低的多项式.

(a) 满足 $b(3)=b(5)=0$ 的所有 $b(x)$；

(b) 满足 $b(3)\neq0$ 和 $b(2)=0$ 的所有 $b(x)$；

(c) 满足 $b(3)=0$, $b(6)=b(7)$ 的所有 $b(x)$；

(d) 使得 $b(x)$ 的某个幂可被 $(x+1)^4(x+2)$ 整除的所有 $b(x)$.

20. 设 S 是 F 上多项式的任意集合，它包含其中任意两个元素之差，并且当它包含任意 $b(x)$，就必包含 $xb(x)$ 和 $ab(x)$，这里 a 是 F 中任意常数，证明 S 是一个理想.

*§3.9 其他唯一因子分解整环

考虑有理数域 $\mathbf{Q}$ 上关于两个未定元的多项式形式构成的整环 $\mathbf{Q}[x, y]$. $a(x, y)=x$ 和 $b(x, y)=y^2+x$ 的公因子只能是 1 及其相伴，但是不存在多项式 $s(x,y)$ 和 $t(x,y)$，满足关系式 $xs(x,y)+(y^2+x)t(x,y)=1$，这因为不管怎样选取 s 和 t，多项式 $xs+(y^2+x)t$ 总没有非零常数项. 类似地，在整系数多项式环 $\mathbf{Z}[x]$ 中，2 和 x 的最大公因子为 1，而关系式 $2s(x)+xt(x)=1$ 无解. 于是这两个整环中定理 12 都不成立.

然而我们可以证明，上述两种情况分解成素因子是可能的而且是唯一的(定理 14 成立).

定义 满足下列条件的整环称为唯一因子分解整环（有时称为高斯整环):

(i) 非单位的任意元素可分解成素因子;

(ii) 除了相差次序和单位因子外，这种因子分解是唯一的.

我们的主要结果是，如果 G 是任意唯一因子分解整环，那么 G 上任意多项式形式的整环 $G[x_1, \cdots, x_n]$ 同样是唯一因子分解整环. 对 n 用归纳法，显然可把问题归结为关于单个未定元的 $G[x]$ 的情形，我们将考虑这种情形.

首先，我们把 G 嵌入 F 中，$F=Q(G)$ 为 G 的形式商构成的域(§2.2 定理 5)，并同 $G[x]$ 一起考虑 $F[x]$. 我们可以典型地把 G 想象为整数环，相应地把 F 想象为有理数域.

其次，$F[x]$ 的多项式如果满足下列条件，我们就称它为本原多项式：(i)它的系数在 G 中("整数")，(ii)它的所有系数没有除

G 中单位外的公因子. 例如 $3-5x^2$ 是本原多项式, $3-6x^2$ 就不是.

引理 1（高斯） 两个本原多项式的乘积是本原多项式.

证明 记

$$\sum_k c_k x^k = \sum_i a_i x^i \cdot \sum_j b_j x^j,$$

如果它不是本原多项式, 那么 G 中某素元素 p 将整除每个 c_k. 设 a_m 和 b_n 分别是 $\sum_i a_i x^i$ 和 $\sum_j b_j x^j$ 中第一个不能被 p 整除的系数（它们确实存在, 因为这两个多项式都是本原的）. 那么乘积的系数 c_{m+n} 的计算公式(3)给出

$$a_m b_n = c_{m+n} - [a_0 b_{m+n} + \cdots + a_{m-1} b_{n+1} + a_{m+1} b_{n-1} + \cdots + a_{m+n} b_0],$$

因为上式右边所有项都能被 p 整除, 所以乘积 $a_m b_n$ 能被 p 整除. 这就推出 p 必出现在 a_m 或者 b_n 的唯一因子分解式之中, 这与选取 a_m 和 b_n 为不能被 p 整除相矛盾.

引理 2 $F[x]$ 的任意非零多项式 $f(x)$ 可以写成 $f(x)=c_f f^*(x)$, 其中 c_f 在 F 中, $f^*(x)$ 是本原多项式. 此外, 对于给定的 $f(x)$, 常数 c_f 和本原多项式 $f^*(x)$ 除了相差一个可能的 G 的单位因子外是唯一的.

证明 首先记

$$f(x)=\frac{b_0}{a_0}+\frac{b_1}{a_1}x+\cdots+\frac{b_n}{a_n}x^n, \quad a_i, b_i \in G\text{（“整数”）},$$

设 $c=\dfrac{1}{a_0 a_1 \cdots a_n}$, 我们有 $f(x)=cg(x)$, 其中 $g(x)$ 的系数都在 G 中. 现在令 c' 是 $g(x)$ 的所有系数的最大公因子（这是存在的, 因为 G 中唯一因子分解定理成立）. 显然, $f^*(x)=\dfrac{g(x)}{c'}$ 是本原的, 并且 $f(x)=(cc')f^*(x)$, 取 $c_f=cc'$, 这就是引理中的第一个结论.

为了证明 c_f 和 f^* 的唯一性, 只须证明 f^* 除了相差 G 的单位

因子外是唯一的. 为此假定 $f^*(x)=cg^*(x)$, 其中 $f^*(x)$和 $g^*(x)$ 都是本原多项式, 并且 $c\in F$. 记 $c=\frac{u}{v}$, 其中 $u, v\in G$ 并且互素, 因此 $ug^*(x)=vf^*(x)$. 那么 v 就是 $ug^*(x)$的所有系数的公因子, 因为 u 和 v 互素, 所以 v 整除 $g^*(x)$的每个系数. 但是 $g^*(x)$是本原的, 因此 v 是 G 的单位. 由对称性, u 也是一个单位, 所以$\frac{u}{v}$是 G 的单位. 这就完成了证明.

引理 2 的常数 c_f 称为 $f(x)$的容度, 除相差 G 中相伴元素外它是唯一的.

引理 3 *如果在 $G[x]$ 中或者甚至在 $F[x]$ 中有 $f(x)=g(x)h(x)$, 那么 $c_f\sim c_g c_h$, 并且 $f^*(x)\sim g^*(x)h^*(x)$, 这里"$\sim$"表示 $G[x]$ 中的相伴关系.*

证明 根据引理 1, $g^*(x)h^*(x)$ 是本原多项式, 显然它还是 $f^*(x)$的某常数倍. 根据引理 2, 两者仅相差 G 的一个单位因子 u (所以两者是相伴), 因此 $c_f=u^{-1}c_g c_h$. 证毕

这个引理的一个推论是, 如果 $f(x)$在 $G[x]$中, 并且它在 $F[x]$ 是可约的, 那么 $f(x)=uc_f g^*(x)h^*(x)$. 这就给出下面关于定理 10 推论的一个推广.

定理 15 *整系数多项式如果它能分解成有理系数多项式之积, 那么它一定能分解成同次数的整系数多项式.*

更重要的是, 由引理 3, 在 $G[x]$中任意 $f(x)$的因子分解式分离成两个独立的部分: 一个是它的"容度"c_f 的分解, 一个是它的"本原部分"$f^*(x)$的分解. 前者相当于 G 的因子分解, 因此根据假设这种分解是可能的而且是唯一的. 根据引理 3, 后者本质上等价于 $F[x]$中的分解, 由定理 14, 这种分解是可能的而且是唯一的. 这就提出了

引理 4 *如果 G 是唯一因子分解整环, 那么 $G[x]$也是唯一因*

子分解整环.

证明 由引理 2，任何多项式 $f(x)$ 可分解成 $f(x)=c_f f^*(x)$，因此 $G[x]$ 中的素元素 $f(x)$ 必然有因子 c_f 或者 f^* 中的一个是 $G[x]$ 的单位. 于是 $G[x]$ 的素元素分为两种类型：一类是 G 的素元素 p，一类是本原不可约多项式，它不仅在 $G[x]$ 中而且在 $F[x]$ 中都是不可约的(定理 15).

现在考虑 $G[x]$ 中任意多项式 $f(x)$. 它在 $F[x]$ 中有一个因子分解，因而它与 $G[x]$ 的某些本原不可约多项式的乘积相伴，记作 $f(x)\sim q_1(x)\cdots q_m(x)$. 于是 $f(x)=dq_1(x)\cdots q_m(x)$，其中 G 的元素 d 可分解成 G 的素因子 p_i 的积，总之，$f(x)$ 可分解成

$$f(x)=p_1\cdots p_r q_1(x)\cdots q_m(x),$$

这里每个 p_i 是 G 的素元素，每个 $q_j(x)$ 是 $G[x]$ 的本原不可约多项式.

出现在这个因子分解式中的多项式 $q_j(x)$ 除相差 G 的单位外是唯一确定的，它是作为 $F[x]$ 中的 $f(x)$ 的唯一不可约因子的本原部分. 因为 $q_j(x)$ 都是本原的，所以乘积 $p_1\cdots p_r$ 实质上是 $f(x)$ 的唯一的容度. 因此 p_1，…，p_r(实质上)是 c_f 在给定整环 G 中的全部因子(唯一的). 这就证明了 $G[x]$ 是唯一因子分解整环.

由引理 4 并对 n 用归纳法我们可得出结论

定理 16 如果 G 是任意唯一因子分解整环，那么 G 上每个多项式整环 $G[x_1,\cdots,x_n]$ 也是唯一因子分解整环.

§14.10 中我们将举出一个整环，它不是唯一因子分解整环，在这个整环上，不论定理 12 还是定理 14 都不成立(参见 §3.6 习题11(g)).

习　题

1. 把下列各式表示成 $\mathbf{Z}[x]$ 的本原多项式与一个常数的乘积:

$$3x^2+6x+9, \qquad \frac{x^2}{2}+\frac{x}{3}+7.$$

2. 列出 $6x^2+3x-3$ 在 $\mathbf{Z}[x]$中的全部因子.

*3. 叙述一个求 $\mathbf{Z}[x]$ 中的多项式 $f(x)$ 的全部线性因子 $ax+b$ 的系统方法.

4. 整数 n 取什么值时, $2x^2+nx-7$ 在 $\mathbf{Q}[x]$中是可约的.

5. 找出下面多项式在 $\mathbf{Q}[x]$中全体素因子:

$$x^3-1001x^2-1, \quad x^4+50x^2+2.$$

6. 证明: 在唯一因子分解整环中的两个元素 a 和 b 总有最大公因子 (a, b)和最小公倍数$[a, b]$.

7. 证明: 在任意唯一因子分解整环中, $ab\sim(a, b)[a, b]$.

8. 象§3.8 习题 15 和 16 所指出的"互素"元素的性质, 在每个唯一因子分解整环中成立吗?

9. 按照正文的记号, 直接证明:

(a) 在 $G[x]$ 中, $c_f f^*(x)\,|\,c_g g^*(x)$ 当且仅当在 G 中 $c_f|c_g$ 并且在 $F[x]$中 $f^*(x)\,|\,g^*(x)$.

(b) 用(a)证明: 在 $G[x]$中整除乘积 $a(x)b(x)$的 "素元素" 必整除 $a(x)$或整除 $b(x)$.

10. 证明: 如果在 $F[x]$ 中 $f(x)$与 $g(x)$ 互素, 那么 $yf(x)+g(x)$ 在 $F[x, y]$中是不可约的.

11. 在 $\mathbf{Q}[x, y]$中, 把下列各式分解成不可约因子的乘积, 并证明分解出的因子确实是不可约的:

(a) x^3-y^3, (b) x^4-y^2,

(c) x^6-y^6, (d) $x^7+2x^3y+3x^2+9y$.

12. 找出 $\mathbf{Z}_2[x, y]$中所有次数≤2 的不可约多项式.

13. 证明: 在 $\mathbf{Q}[x, y]$中, 方程

$$1=s(x, y)(x-2)+t(x, y)(x+y-3)$$

不存在多项式解.

14. 证明: 对于 $F[x, y]$中的多项式 $f(x, y)$, 如果存在一个替换 $x\to t^r$, $y\to t^s$, 它产生一个多项式 $f(t^r, t^s)$在 $F[t]$中是不可约的, 并假定 $f(t^r, t^s)$的次数是所有整数 mr 和 ns 的最大值(其中 m, n 是出现在 f 中的某一项 x^my^n 的指数), 那么 $f(x, y)$在 $F[x, y]$就是不可约的.

*15. (克罗内克尔(Kronecker))证明：如果在 $\mathbf{Z}[x]$ 中 $f(x)|g(x)$，那么对 $\mathbf{Z}$ 中每个 c 有 $f(c)|g(c)$。从这个事实（和 § 3.2 的插值公式 (5)) 出发，提出一个以有限步可以求得 $\mathbf{Z}[x]$ 中任意多项式 $f(x)$ 的给定次数的全部因子的系统方法.

16. 设 D 是所有这样有理数的集合，它可以写成分数 $\frac{a}{b}$，其分母 b 与 6 互素. 证明：D 是唯一因子分解整环.

* § 3.10 爱森斯坦不可约判别准则

显然，方程 $x^n=1$，当 n 为奇数时，除了 $x=1$ 外没有有理根. 由此得出 x^n-1 在 $\mathbf{Q}$ 上除了 $x-1$ 外没有首一线性因子. 但是这还不能证明商

$$\phi(x)=\frac{x^n-1}{x-1}=x^{n-1}+x^{n-2}+\cdots+x+1 \tag{13}$$

是不可约的. 事实上，这个多项式，除 n 为素数外是可约的.

我们现在证明，如果 $n=p$ 是素数，那么由(13)定义的分圆多项式 $\phi(x)$ 是不可约的，因此 $x^p-1=(x-1)\phi(x)$ 给出 x^p-1 的(唯一)因子分解式(分解成首一不可约因子). 这个结果将从下面关于不可约性的充分条件推出，这个定理是由爱森斯坦(Eisenstein)给出的.

定理 17 *对于给定的素数 p，设*

$$a(x)=a_nx^n+a_{n-1}x^{n-1}+\cdots+a_0$$

是一整系数多项式，如果

$$a_n\not\equiv 0 \pmod p,\ a_{n-1}\equiv a_{n-2}\equiv\cdots\equiv a_0\equiv 0 \pmod p,$$

$$a_0\not\equiv 0 \pmod{p^2},$$

那么 $a(x)$ 在有理数域上是不可约的.

证明 假定可能有一个因子分解 $(n=m+k)$

$$a(x)=(b_mx^m+b_{m-1}x^{m-1}+\cdots+b_0)(c_kx^k+c_{k-1}x^{k-1}+\cdots+c_0),$$

根据定理 15，我们可以假定这两个因子都是整系数的，即 b_i，c_j 为

整数. 因为 $a_0=b_0c_0$, 所以假设中的第三个条件 $a_0\not\equiv 0 \pmod{p^2}$ 意味着 b_0 和 c_0 不能同时被 p 整除. 固定一种情况, 我们假设 $b_0\not\equiv 0 \pmod p$, 而 $c_0\equiv 0 \pmod p$. 但是 $b_mc_k=a_n\not\equiv 0 \pmod p$, 故 $c_k\not\equiv 0 \pmod p$. 选取最小的指标 $r\,(r\leqslant k)$ 使得 $c_r\not\equiv 0 \pmod p$, 而 $c_{r-1}\equiv\cdots\equiv c_0\equiv 0 \pmod p$, 那么

$$a_r=b_0c_r+b_1c_{r-1}+\cdots+b_rc_0\equiv b_0c_r \pmod p.$$

但是, 因为 p 是素数, 所以由 $b_0\not\equiv 0$ 和 $c_r\not\equiv 0 \pmod p$ 得出 $a_r\not\equiv 0 \pmod p$. 根据假设, 这样的系数 a_r 只可能是 a_n, 故 $r=n$. 这表明第二个因子的次数必须是 n, 所以多项式 $f(x)$ 确实是不可约的. 证毕

当 $n=p$ 时, 这个判别准则可应用于多项式(13), 这时(13)式给出分圆多项式

$$\phi(x)=\frac{x^p-1}{x-1}=x^{p-1}+x^{p-2}+\cdots+x+1. \qquad (13')$$

实际上, 爱森斯坦判别准则还不能直接用于(13′), 不过这可以做一个简单的变量替换 $y=x-1$, 并由二项式展开得到

$$\frac{x^p-1}{x-1}=\frac{(y+1)^p-1}{y}=y^{p-1}+py^{p-2}+\frac{p(p-1)}{1\cdot 2}y^{p-3}+\cdots+p.$$

出现在上式右边的二项系数都是可被素数 p 整除的整数, 这是因为 p 作为因子出现在每个系数的分子中, 并且不能被分母中比它小的整数消去. 这样, 作为 y 的多项式满足爱森斯坦判别准则的假设条件, 因此是不可约的, 原来(13′)式的分圆多项式 $\phi(x)$ 仍保持这种不可约性.

习　题

1. 下列多项式中哪些在有理数域上是不可约的:

   x^3+2x^2+4x+2, 　　x^3+2x^2+2x+4,

   x^7-47, 　　x^4+15.

2. 用爱森斯坦判别准则证明: x^2+1 在有理数域上是不可约的.

3. 证明：如果 $f(x)$ 在域 F 上是不可约的，那么对 F 中的任意 a，$f(x+a)$ 还是不可约的.

4. 证明：如果 n 次 $(n>k)$ 多项式 $f(x)$ 满足条件 $a_n\not\equiv 0$, $a_k\not\equiv 0$, $a_{k-1}\equiv\cdots\equiv a_0\equiv 0 \pmod p$，且 $a_0\not\equiv 0 \pmod{p^2}$，那么 $f(x)$ 有一个次数至少为 k 的不可约因子.

*5. 证明：如果 $2n+1$ 次奇次多项式 $f(x)$ 满足条件 $a_{2n+1}\not\equiv 0 \pmod p$, $a_{2n}\equiv\cdots\equiv a_{n+1}\equiv 0 \pmod p$, $a_n\equiv a_{n-1}\equiv\cdots\equiv a_0\equiv 0 \pmod{p^2}$, $a_0\not\equiv 0 \pmod{p^3}$，那么 $f(x)$ 是不可约的.

6. (a) 设 $f(x)$ 为整系数首一多项式，证明：$f(x)$ 对于模 p 的不可约性蕴含着它在 $\mathbf{Q}$ 上的不可约性.

(b) 证明：$\mathbf{Z}$ 上的 $f(x)$ 的每个因子在模 p 之下必可化为 $\mathbf{Z}_p$ 上相同次数的因子.

(c) 用这个办法（用小的素数 p）检验下列多项式在 $\mathbf{Q}$ 上的不可约性：

$$x^3+6x^2+5x+25, \qquad x^3+6x^2+11x+8,$$
$$x^4+8x^3+x^2+2x+5.$$

7. (a) 设 $F[t]$ 是关于未定元 t 的全体多项式的整环，对于系数在 $F[t]$ 上的多项式 $f(x)$，叙述并证明类似于爱森斯坦判别准则的定理.（提示：用 t 代替 p.）

(b) 用此定理证明 $x^3+3t^2x^2+2tx^2+t^4x+7t+t^2$ 在 $F[t,x]$ 中是不可约的.

*§ 3.11 部分分式

多项式的唯一因子分解定理可以用于有理函数上，以便得到某些简化的表达式，例如在积分学中用到的部分分式的展开. 现在我们就对此进行讨论，这一节涉及到的多项式和有理分式都假定它们的系数是在某一固定的域 F 上.

首先考虑这样的有理式 $\dfrac{b(x)}{a(x)}$，它的分母分解成互素的因子 $c(x)$ 和 $d(x)$，即 $a(x)=c(x)d(x)$. 由定理 12 给出多项式 $s(x)$ 和 $t(x)$ 适合 $1=sc+td$，因此

$$\frac{b(x)}{c(x)d(x)}=\frac{s(x)b(x)}{d(x)}+\frac{t(x)b(x)}{c(x)}. \tag{14}$$

这一结果可叙述成

引理 1 一个有理分式，如果它的分母是两个互素多项式 $c(x)$ 和 $d(x)$ 的乘积，那么它可以表示成分母分别为 $c(x)$ 和 $d(x)$ 的两个商式之和。

如果分母 $a(x)$ 是一个幂 $a(x)=[c(x)]^m$，$m>1$，那么这个方法还不能直接应用. 改换另法，按照辗转相除法，用 $c(x)$ 去除分子，有

$$b(x)=q_0(x)c(x)+r_0(x),$$

然后再用 $c(x)$ 去除商 $q_0(x)$ 得

$$q_0(x)=q_1(x)c(x)+r_1(x),$$

两个等式合起来便得

$$b(x)=q_1(x)[c(x)]^2+r_1(x)c(x)+r_0(x).$$

重复这一过程(注意，这个说法隐含了归纳过程)，采用缩写记号我们得到①

$$b(x)=q_{m-1}c^m+r_{m-1}c^{m-1}+\cdots+r_1c+r_0, \tag{15}$$

这里每个多项式 $r_i=r_i(x)$，如果不为零，则它的次数低于 $c(x)$ 的次数. 现在有理分式 $\frac{b(x)}{a(x)}$ 变成

$$\frac{b}{c^m}=q_{m-1}+\frac{r_{m-1}}{c}+\frac{r_{m-2}}{c^2}+\cdots+\frac{r_1}{c^{m-1}}+\frac{r_0}{c^m}. \tag{16}$$

这就证明了

引理 2 以幂 $[c(x)]^m$ 为分母的有理式可以表示成一个多项式加上一些有理分式之和，每个有理分式的分母是 $c(x)$ 的幂，分子的次数低于 $c(x)$ 的次数.

---

① 这同 §1.5 习题 11 关于整数的十进小数展开式相类似.

综合这些结果，可把任意给定的分母 $a(x)$ 分解成首一不可约多项式的乘积．如果把相同的不可约因子归在一起，我们有

$$a(x)=a_0[p_1(x)]^{m_1}[p_2(x)]^{m_2}\cdots[p_k(x)]^{m_k}, \tag{17}$$

其中指数 m_i 为整数．任意两个不同的首一不可约多项式 $p_1(x)$ 和 $p_2(x)$ 当然互素，因此幂 $[p_1(x)]^{m_1}$ 和 $[p_2(x)]^{m_2}$ 除了单位外没有公因子，所以是互素的．因此可以应用引理 1 把分母分解成其中一个因子是 $c_1(x)=[p_1(x)]^{m_1}$，而另一个因子是 (17) 式除去 $[p_1(x)]^{m_1}$ 后余下的部分．重复进行下去，就可把 $\frac{b}{a}$ 表为一些分式的和，每个分式的分母是 $[p_i(x)]^{m_i}$．最后还可用(16) 式把每个分式进一步化简．

定理 18 任意有理分式 $\frac{b(x)}{a(x)}$ 可以表示成一个 x 的多项式加上形为 $\frac{r(x)}{[p(x)]^m}$ 的（“部分”）分式之和，这里 $p(x)$ 为不可约多项式，$r(x)$ 的次数低于 $p(x)$ 的次数．所出现的分母 $[p(x)]^m$ 是原来分母 $a(x)$ 的一切因子．

如果要找到给定的有理函数 $\frac{b(x)}{a(x)}$ 的明显的部分分式表达式，那么照定理 18 证明的每一步去做就可得到．这样的证明称为“构造性”证明．它总是可以用于有关对象的实际计算．

例如，在有理数域 Q 上考虑 $\frac{x+1}{x^3-1}$. 分母是 $(x-1)(x^2+x+1)$，第二个因子是不可约的，由辗转相除法得到 $x^2+x+1=(x+2)\cdot(x-1)+3$，用原来分式的分子 $(x+1)$ 乘这个方程，我们得到

$$3(x+1)=(x+1)(x^2+x+1)-(x^2+3x+2)(x-1);$$

$$\frac{3(x+1)}{x^3-1}=\frac{x+1}{x-1}-\frac{x^2+3x+2}{x^2+x+1}.$$

所得的每个分式可以通过辗转相除法进一步化简①得出

$$\frac{3(x+1)}{x^3-1}=\frac{2}{x-1}-\frac{2x+1}{x^2+x+1}.$$

在实数域 R 上，不可约多项式只能是线性多项式和满足 $b^2-4ac<0$ 的二次多项式 ax^2+bx+c.（这个命题将在§5.4 定理 7 中证明.）因此，在 R 上任意有理函数可以表示成分母是线性多项式的幂和二次多项式的幂的分式之和. 这个事实在微积分学中用来证明：任何有理函数的不定积分可以通过"初等函数"（即代数函数、三角函数、指数函数以及它们的反函数）来表示. 根据定理 18，有理分式求积时，本质上可化为$\frac{c}{(x+a)^m}$和$\frac{c(x+d)}{(x^2+ax+b)^m}$ 两种类型的项之和求积. 因此，如果这两种类型的函数的积分可以通过初等函数表示（这是可以做到的），那么关于积分的命题就将被证明.

习　题

1. 分解下式成部分分式（在有理数域上）：

(a) $\frac{3x+4}{x^2+3x+2}$，　　(b) $\frac{1}{x^2-a^2}$，

(c) $\frac{1}{x^3+x}$，　　(d) $\frac{a^2}{x^3-a^3}$，

(e) $\frac{3}{x^4+5x^2+4}$，　　(f) $\frac{3x-7}{(x-2)^2}$.

2. 分别在下列域上把$\frac{4x+2}{x^3+2x^2+4x+8}$分解成部分分式：

(a) 模 5 整数域 $\mathbf{Z}_5$，

(b) 有理数域 $\mathbf{Q}$.

---

① 把这个直接方法同微积分教科书中常用的方法加以比较，在那里，我们必须解出出现在项$\frac{A}{x-1}$和$\frac{Bx+C}{x^2+x+1}$中的未知系数 A, B, C.

3. 设 $a_0, a_1, \cdots, a_n$ 为不同元素, 证明:

$$\frac{1}{\prod_i (x-a_i)}=\sum_i \frac{C_i^{-1}}{x-a_i},\ \text{其中}\ C_i=\prod_{j\neq i}(a_i-a_j).$$

(提示: 用拉格朗日插值公式展开 $p(a_i)=1$.)

4. 对 m 用归纳法, 证明(13)式.

5. 用归纳法给出定理 18 的详细证明.

6. (a) 证明: 任意非多项式的有理式可以表示成一个多项式与另一个有理式之和, 这有理式的分子是次数低于分母次数的多项式.

(b) 这种表示是唯一的吗?

7. 如果限定所有分式(包括部分分式)的分子的次数低于相应的分母的次数, 证明下列引理和定理中的表达式是唯一的:

(a) 在引理 1 中, (b) 在引理 2 中,

(c) 在定理 18 中.

8. (a) 设 $(x-a)$ 不是 $f(x)$ 的因子, 证明

$$\frac{1}{(x-a)^r f(x)}=\frac{C}{(x-a)^r}+\frac{g(x)}{(x-a)^{r-1}f(x)}.$$

式中 $C=\frac{1}{f(a)}$, 并且 $g(x)$ 是一个适当的多项式.

*(b) 对于分母可分解成线性因子的有理函数, 利用习题 8(a) 或习题 3 化成标准形式.

9. (a) 设 $p(x)$ 是不可约的, 证明: 一个分式 $\frac{b(x)}{p(x)}$ (b 与 p 互素) 的任何表示成分式之和的表达式, 必至少包含一个其分母可被 $p(x)$ 整除的分式. (这就意味着 $\frac{b(x)}{p(x)}$ 的进一步部分分式的分解是不可能做到的.)

(b) 对于 $\frac{b(x)}{[p(x)]^m}$ 能有相同的说法吗?

*10. 求下式之和:

$$\frac{1}{(x+1)(x+2)}+\frac{2}{(x+2)(x+4)}+\cdots+\frac{2^n}{(x+2^n)(x+2^{n+1})}.$$

*11. 建立表示任何有理数为"部分分数"之和的方法, 其中部分分数具有特殊形式 $\frac{a}{p^n}$ (p 为素数, $0\leq a<p$). 例如 $\frac{1}{6}=\frac{1}{2}-\frac{1}{3}$.

*12. 假定 § 5.3 的定理 6 成立，证明：任意一个复有理函数的不定积分是由一个有理函数与复对数 $\log(z+a_i)=\int\frac{dz}{z+a_i}$ 的线性组合组成的和.

*13. 证明：在任意有序整环 D 上，如果我们选取那些具有正的首项系数的多项式（也就是在(1)式中 $a_n>0$）作为“正”的多项式，那么多项式环 $D[x]$ 就成为有序整环.

第四章 实 数

§4.1 毕达哥拉斯二难推论

抽象代数虽然相当多地强调了一般的域和整环所具有的大量性质，但是实数域和复数域对于定量地描述我们生活的世界还是不可缺少的．例如，在代数和几何的关系中，不仅在初等解析几何而且在进一步讨论矢量和矢量分析(第七章)中，这两个域都是很重要的．此外，它们还具有独特的代数性质，这些性质将在本书后几章中展示出来．特别重要的是实数域**R**的序的完备性和复数域**C**的代数完备性．我们在第四、五两章叙述这些完备性及其代数含意．

希腊人研究实数用的是纯几何方法．对他们来说，一个数只不过是两个线段a和b的长度之比$(a:b)$．他们直接给出关于比的相等以及比的加法、乘法、减法和除法的几何构造．全体实数构成有序域(§2.4)的公设在希腊人看来，是由平面几何一系列公设(包括平行公设)证明的一组几何定理．

古希腊哲学家毕达哥拉斯(Pythagoras)知道，正方形对角线长d与它的边长s之比$r=\dfrac{d}{s}$一定满足方程

$$d^2=(rs)^2=r^2s^2=s^2+s^2\ (\text{毕达哥拉斯定理}). \qquad (1)$$

因此他推理，存在一个“数”r，满足$r^2=1+1=2$.

另一方面，他发现r不能表示成两个整数的商$r=\dfrac{a}{b}$，这是因为$\left(\dfrac{a}{b}\right)^2=2$意味着$a^2=2b^2$，根据素因子分解定理，2每次整除$a$，

就恰有两次整除 a^2，因此 2 整除 a^2 偶数次，类似地，2 整除 $2b^2$ 奇数次，所以 $a^2=2b^2$ 没有整数解.

只要把不能表为整数之商的数设为无理数，我们就能避开上述"毕达哥拉斯二难推论".

类似的论证指出，立方体 C 的对角线长与它的边长之比为 $\sqrt{3}$，C 的边长与具有一半体积的立方体的边长之比为 $\sqrt[3]{2}$，这些都是无理数. 这些结果是 § 3.7 定理 10 的特殊情况.

此外，π, e 及许多别的数都是无理数(因此 π 不会恰好是 $\frac{22}{7}$，甚至 3.1416). 我们在第十四章将证明，绝大多数的实数不仅是无理数，而且甚至不能满足任何一个代数方程(与 $\sqrt{2}$ 不同). 为了回答"什么是实数？"这个基本问题，我们要用到一些新的概念.

一个概念是连续性——如果实轴分成两段，那么这两段必在公共边界点上相接. 第二个概念是，有序的有理数域 $\mathbf{Q}$ 在实数域里稠密，因此，每个实数是一个或多个有理数序列(例如精确到 n 位的有限小数逼近序列)的极限. 这个概念还可表述为

$$\text{如果 } x<y\text{，那么存在 } \frac{m}{n}\in\mathbf{Q}\text{，使得 } x<\frac{m}{n}<y. \tag{2}$$

实数的这个性质首先被希腊数学家欧多克斯 (Eudoxus)发现. 欧多克斯把 $x=a:b$ 和 $y=c:d$ 都看作线段长度之比，线段长度 a 的整数倍 na 可用几何方法做出，他规定 $(a:b)=(c:d)$ 当且仅当对一切正整数 m 和 n,

$$\begin{aligned} &\text{由}\quad na>mb\quad\text{推出}\quad nc>md,\\ &\text{由}\quad na<mb\quad\text{推出}\quad nc<md. \end{aligned} \tag{3}$$

上述这两个概念可以合并成一个完备性公设，由这个公设我们可以通过有序域 $\mathbf{Q}$ 的自然扩张来构造实数域. 这个"完备性"公设类似于整数的良序公设 (§ 1.4)，二者都涉及无限集合的性质，

这种性质是非代数的. 我们将要看到，这个完备性公设，对于建立实数域的某些重要代数性质（例如每个正数都有平方根）是必需的.

习　　题

1. 给出$\sqrt{3}$是无理数的直接证明.

2. 证明: $\sqrt[n]{a}$是无理数，除非整数 a 是某一整数的 n 次幂.

3. 证明: $\log_{10}3$ 是无理数. (提示: 利用对数定义.)

4. 证明: 如果 $a\neq0$ 和 b 都为有理数，那么，$au+b$ 为有理数当且仅当 u 为有理数.

5. 证明: $\sqrt{2}+\sqrt{5}$是无理数. (提示: 从 $x-\sqrt{2}=\sqrt{5}$两边平方出发，找出一个以$\sqrt{2}+\sqrt{5}$为根的多项式方程.)

*6. 证明: 定义为收敛级数$\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{k!}$的数 e 是无理数. (提示: 如果是有理数，那么对某个 n, $(n!)e$ 可以是整数.)

§4.2　上界与下界

实数域可以最简单地被描述为具有下列性质的有序域，即域中任意有界集合都有最大下界和最小上界. 我们现在就定义这两个概念，它们类似于可除性理论中的最大公因子和最小公倍数的概念.

定义　设 S 为有序整环 D 中某些元素构成的集合. 如果 D 中元素 b(它本身不一定在 S 中)使得对 S 中每个元素 x, 有 $b\geqslant x$, 则称 b 为 S 的上界. 对于 S 的上界 b, 如果 D 中没有比 b 小的元素是 S 的上界，也就是说，如果对任意 $b'<b$, S 中都存在一个 x 适合 $b'<x$, 那么 b 就是 S 的最小上界.

把上面定义中的"$>$"换成"$<$"，"$<$"换成"$>$"，可定义 S 的下界和最大下界的概念.

由定义直接可知，D 的子集 S 至多有一个最小上界，并且至多有一个最大下界（为什么？）.

直观上，把实数当作连续直线（x 轴）上的点来考虑，并想象在这条直线上，全体有理数密集地撒布在它们各自本来的位置上. 由此我们容易得出结论：每个实数 a 可定义为所有适合 $r<a$ 的有理数 $r=\frac{m}{n}(n>0)$ 的集合 S 的最小上界. 例如，$\sqrt{2}$ 是大于所有适合 $m^2<2n^2$ 的比 $\frac{m}{n}(m>0,\ n>0)$ 的最小实数. 也就是说，数 $\sqrt{2}$ 是适合 $m^2<2n^2$ 的正有理数 $\frac{m}{n}$ 的集合的最小上界.

用无限小数表示实数的普通表达式直接包含着把实数看作有理数集合的最小上界的概念. 例如我们可以把 $\sqrt{2}$ 写成最小上界（l. u. b.）和最大下界（g. l. b.）两种形式

$$\begin{aligned}\sqrt{2}&=\text{l. u. b.}\ (1.4,\ \ 1.41,\ \ 1.414,\ \ 1.4142,\cdots)\\&=\text{g. l. b.}\ (1.5,\ \ 1.42,\ \ 1.415,\ \ 1.4143,\cdots).\end{aligned}\qquad(4)$$

由熟悉的小数表达式的性质很容易看出，每个正实数非空集合 T 有最大下界，如下所述.

考虑把 T 的元素只取前 n 位的 n 位小数，它们中间必有一个最小的元素，这是因为只有有限个非负 n 位小数，比 T 的任何给定的元素都小. 设这个最小的 n 位小数是 $k+0.d_1d_2\cdots d_n$，其中 k 为某整数，d_i 为数字. 最小的 $n+1$ 位小数其前 n 位与 $d_1d_2\cdots d_n$ 相同，因此有形式 $k+0.d_1d_2\cdots d_nd_{n+1}$，这里添上一个数字 d_{n+1}. 所以上述构造定义了某一个无限小数

$$c=k+0.d_1d_2d_3\cdots.$$

根据构造，c 就是 T 的下界（因为 T 中没有一个 x 能比 c 的小数表达式小），而且是最大下界（任何比 c 大的小数就不再是 T 的下界了）.

但是，如果把实数定义成无限小数，那么很难证明中学代数中所承认的事实：无限小数系统是有序域①.

习　题

1. 证明：$x=0.12437437437\cdots$表示有理数.（提示：计算$1000\cdot x-x$.）

2. 证明：$y=1.23672367\cdots$表示有理数.

*3. 证明：象习题 1 和 2 那样的任意“循环小数”表示有理数. 对“循环小数”这个术语给出定义.

*4. 反过来证明：任意有理数的小数表达式是“循环的”.（提示：把有理数表示成分数. 并证明，在十进制下，如果在分母去除分子过程中，第m次同第$m-k$次的余数相同，那么所得的商数的数字中就分成k个数字一节无限地重复下去.）

*5. 在十二进制下，习题 4 的结论成立吗？

6. 在以 3 的幂为分母的所有有理数组成的整环中，求出$\sqrt{2}$的三个逐次近似值.

7. 构造出两个不同的有理数集合，它们都以 2 为最小上界.

*8. 序列 $2, \frac{3}{2}, \frac{17}{12}, \frac{577}{408}, \cdots$由递推公式

$$x_1=2,\quad x_{k+1}=\frac{x_k}{2}+\frac{1}{x_k}$$

定义.

(a) 证明：对$k>1$有$x_k=\frac{m_k}{n_k}$，其中$m_k^2=2n_k^2+1$.

(b) 定义$\varepsilon_k=x_k-\sqrt{2}$，证明：$0<\varepsilon_{k+1}<\frac{\varepsilon_k^2}{2\sqrt{2}}$.

(c) 证明：$\text{g.l.b.}\left(2,\frac{3}{2},\frac{17}{12},\cdots\right)=\sqrt{2}$.

---

① 详细请看 J. F. Ritt, *Theory of Functions*(New york, Kings Crown Press, 1947). 困难在于，两个不同的小数实际上是相等的，例如$0.19999\cdots=0.20000\cdots$.

§4.3 实数公设

我们现在将用一组简短的公设来描述实数. 后面我们会看到(定理 6),这些公设唯一地(精确到同构)确定全体实数.

定义 有序整环D是完备的当且仅当D的正元素的每个非空集合在D中有最大下界.

实数公设 实数构成完备的有序域**R**.

我们根据这个公设得出的实数性质, 确实可以导出全体实数的一切熟知的性质, 包括象洛尔(Rolle)定理那样的结果,这个定理在微积分学中, 对于泰勒(Taylor)定理的证明或其他方面是基本的.

但是我们只限于讨论几个简单的应用.

定理 1 在实数域**R**中, 每个具有下界的非空子集S有最大下界,每个具有上界的非空子集T有最小上界.

证明 假设S有下界b. 如果把$1-b$加在S的每个数x上,则得到正数$x-b+1$的集合S'. 根据实数公设,这个集合S'具有最大下界c'. 因此数$c=c'+b-1$是原来集合S的最大下界, 这很容易验证.

对偶地, 如果集合T有上界a, 则T的所有元素的负元素$-y$组成的集合具有下界$-a$, 因此根据上述证明, 它有最大下界b^*. 那么可以证明,数$a^*=-b^*$就是已知集合T的最小上界. 证毕

实数公设保证全体实数构成有序域**R**, 所以§2.6定理18的推论2指出, **R**必包含同构于有理数域**Q**的子域. 因为在第二章里,**Q**仅在同构意义下定义,所以我们也可同样假定实数域**R**包含所有有理数, 因而包含所有整数. 这个约定使上述公设适应于习惯用法,并可使我们证明下面的实数性质(常称为阿基米德定律).

定理 2 在所有实数组成的域**R**(由实数公设定义的)中, 对

任意两个数 $a>0$ 和 $b>0$，存在整数 n 使得 $na>b$.

证明 假定对于两个特定的实数 a 和 b，上述结论是错误的，因而对每个 n，有 $b\geqslant na$. 则所有倍数 na 的集合 S 有上界 b，从而它也有最小上界 b^*. 所以对每个 n，$b^*\geqslant na$，因此对每个 m 也有 $b^*\geqslant(m+1)a$. 这推出 $b^*-a\geqslant ma$，所以 b^*-a 是 a 的所有倍数的集合 S 的上界，但是它小于已知的最小上界，得出矛盾.

推论 对已知实数 a 和 b，$b>0$，总存在整数 q 适合 $a=bq+r$，$0\leqslant r<b$.

这是除法算式的推广，证明留给读者.

这样建立的"阿基米德性质"可以证明欧多克斯条件（参见 §4.1(3)）是合理的.

定理 3 任意两个实数 c 和 d 之间（$c>d$），存在有理数 $\frac{m}{n}$ 适合 $c>\frac{m}{n}>d$.

象前面那样，这个定理由"实数构成完备的有序域"的公设就可证明. 根据假设，$c-d>0$，所以由阿基米德定律有正整数 n 使得 $n(c-d)>1$，即 $\frac{1}{n}<c-d$. 现在设 m 为适合 $m>nd$ 的最小整数，那么 $\frac{m-1}{n}\leqslant d$，因此

$$\frac{m}{n}=\frac{m-1}{n}+\frac{1}{n}<d+(c-d)=c.$$

因为 $\frac{m}{n}>d$，这就完成了证明.

我们可以对上面的证明直观说明如下. 具有固定分母 n 的不同分数 0，$\pm\frac{1}{n}$，$\pm\frac{2}{n}$，…，以长度 $\frac{1}{n}$ 为间隔沿实轴隔开. 为确保一个这样的点能落在 c 和 d 之间，我们只需使间隔 $\frac{1}{n}$ 小于已知的差 $c-d$.

这个定理可用来正式地证明象(4)式那样把实数表示成有理数集合的最小上界的直观想法.

推论 每个实数是某有理数集合的最小上界.

证明 对于已知实数 c, 设 S 表示所有有理数 $\frac{m}{n} \leqslant c$ 的集合. 那么 c 是 S 的上界, 根据定理 3, 没有比 c 小的实数 d 可以是 S 的上界, 因此 c 是 S 的最小上界.

习 题

1. 证明: 不存在这样的有序整环 D, 其中每个非空集合具有最小上界. (提示: D 本身可以没有上界.)

2. 证明: 有序整环 $\mathbf{Z}$ 是完备的.

3. 用几何语言叙述关于实轴的点的公设, 它断言: 有界集合具有最小上界和最大下界(用词"左"和"右").

4. 分别指出下列有理数集合的最小上界:

(a) $\frac{1}{3}, \frac{4}{9}, \frac{13}{27}, \frac{40}{81}, \cdots,$

(b) $\frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{7}{8}, \frac{15}{16}, \cdots.$

5. 设集合 S 具有最小上界 a^* 和最大下界 b^*.

(a) 详细证明: 为什么所有数 $-3x$(x 在 S 中)的集合具有最小上界 $-3b^*$ 和最大下界 $-3a^*$.

(b) 用同样的方法找出, 所有数 $x+5$(x 在 S 中)的集合的最小上界和最大下界.

6. 在习题 5 的条件下, 并假设 $b^*>0$, 分别找出下列集合的最小上界:

(a) 所有数 $7x+2$(x 在 S 中)的集合,

(b) 所有数 $\frac{1}{x}$($x \neq 0$, 在 S 中)的集合.

7. 设 S_1 和 S_2 为分别具有最小上界 b_1 和 b_2 的实数集合, 找出下列集合的最小上界:

(a) 所有和 s_1+s_2($s_1 \in S_1$, $s_2 \in S_2$)的集合 S_1+S_2,

(b) 或属于 S_1 或属于 S_2 的所有元素的集合.

8. 集中列出一组完整的实数公设.

*9. 构造一组正实数公设. (提示: 参见 § 2.5.)

10. 证明: 在有序域中, 一个元素 a^* 是集合 S 的最小上界当且仅当 (i) 对一切 $x\in S$, $x\leq a^*$; (ii) 对域中每个正的 e, S 中都有一个 x 适合

$$|x-a^*|<e.$$

11. 证明: 任意两个实数 c 和 d 之间 $(c<d)$, 存在有理数的立方 $\left(\frac{m}{n}\right)^3$ 适合 $c<\left(\frac{m}{n}\right)^3<d$. 对于有理数的平方, 这个结论还正确吗?

12. 设 $n>1$ 是整数, 证明: 任意两个实数 c 和 d 之间 $(c>d)$, 存在形为 $\frac{m}{n^k}$ 的有理数, 其中 m 和 k 为适当的整数.

13. 设 a, b, c 和 d 为完备的有序域的正元素, 证明: $\frac{a}{b}=\frac{c}{d}$ 当且仅当欧多克斯的条件(3)式成立.

14. 详细证明定理 2 的推论.

§ 4.4 多项式方程的根

我们现在将指出怎样利用最小上界的存在性来证明实数系 **R** 的各种性质, 首先包括象 $x^2=2$ 这样方程解的存在性.

定理 4 如果 $p(x)$ 为实系数多项式, $a<b$, 并且 $p(a)<p(b)$, 那么对满足 $p(a)<C<p(b)$ 的每个常数 C, 方程 $p(x)=C$ 在 a 和 b 之间有根.

几何上, 定理的假设意味着 $y=p(x)$ 的曲线与水平直线 $y=p(a)$ 在 $x=a$ 处相交, 并与水平直线 $y=p(b)$ 在 $x=b$ 处相交; 定理的结论是说: 曲线也必与每条中间的水平直线 $y=C$ 在某点相交①, 这点的 x 坐标在 a 和 b 之间.

证明依赖于下面两个引理.

---

① 数学分析中有一个一般性的定理, 它断言这个结论不仅对于多项式函数 $p(x)$ 成立, 而且对于任意连续函数也成立.

引理 1 对任意实数 x 和 h, 我们有

$$p(x+h)-p(x)=hg(x, h),$$

式中 $g(x, h)$ 是只依赖于 $p(x)$ 的多项式.

证明(参见 § 3.2 定理 3) 根据二项定理, 对于 $p(x)$ 的每个单项 a_kx^k, 这是正确的. 现在对 k 求和并且提出公因子 h, 我们便得到所需要的结论.

引理 2 对于已知的 a, b 和 $p(x)$, 存在实常数 M, 使得满足于 $a\leqslant x\leqslant b$, $a\leqslant x+h\leqslant b$ 的一切 x 和一切正的 h, 有

$$|p(x+h)-p(x)|\leqslant Mh.$$

证明 根据引理 1, 只须证明当 $x\leqslant|a|+|b|$, $|h|\leqslant|b-a|$ 时, 有 $|g(x, h)|\leqslant M$. 但是, 如果我们把 $g(x, h)$ 的每项用它的绝对值代替, 根据 § 1.3 的公式(3), 则使 $|g(x, h)|$ 增大或保持不变. 如果我们再分别用 $|a|+|b|$ 和 $|b-a|$ 代替 $|x|$ 和 $|h|$, 那么又使得到的结果增大或保持不变. 然而, 这个替换给我们一个只依赖于 $p(x)$ 的系数和区间 $a\leqslant x\leqslant b$ 的实常数 M.

有了引理 2, 我们准备证明定理 4. 设 S 表示 a 和 b 之间满足 $p(x)\leqslant C$ 的实数的集合. 因为 $p(a)<C$, 所以 S 是不空的, 并且它以 b 为上界. 因此 S 有实的最小上界 c, 我们来证明 $p(c)=C$.

为此目的, 显然只须排除 $p(c)<C$ 和 $p(c)>C$ 两种可能. 但是, 根据引理 2 由 $p(c)<C$ 可推出, 对 $h=\dfrac{C-p(c)}{M}$, $p(c+h)\leqslant C$. 因此 $(c+h)\in S$. 这与 c 是 S 的上界的定义矛盾. (引理 2 可以应用, 是因为 $c+h\geqslant b$ 显然是不可能的.)

现在剩下 $p(c)>C$ 这种可能. 但是在这种情形下, 再根据引理 2, 对一切正的 $h\leqslant\dfrac{p(c)-C}{2M}$, 有 $p(c-h)>C$, 这与 c 是 S 的最小上界的定义矛盾: $c-\dfrac{p(c)-C}{2M}$ 将给出比 c 小的上界. 因此只留下

$p(c)=C$. 证毕

根据这个定理我们容易证明:

推论 1 如果 $p(x)$ 为正系数多项式,而且没有常数项,$C>0$,那么 $p(x)=C$ 有正实根.

推论 2 如果 $p(x)$ 为奇次多项式,那么对每个实数 C,$p(x)=C$ 有实根.

定理 4 没有给出 $p(x)=C$ 的小数形式的根的实际计算方法,但这是容易做到的. 例如,我们可以设 $c_1=\frac{a+b}{2}$, 则或 $p(c_1)=C$,或 $p(c_1)>C$,或 $p(c_1)<C$. 在第一种情形下,方程的根就找到了;在第二、三种情形下,分别在区间 $a\leqslant x\leqslant c_1$ 和 $c_1\leqslant x\leqslant b$ 中有根,这个区间长度为原来区间的一半. 重复这一过程便可得到 $p(x)=C$ 的根的任何精度的近似值.

如果我们采用线性内插法,且令

$$c_1=a+\frac{[C-p(a)](b-a)}{p(b)-p(a)},$$

则收敛得更快.

其他计算方程根的有效方法在数学分析里讨论. 例如,当 $|x|<1$,我们可以运用无穷级数

$$\sqrt{1+x}=1+\frac{1}{2}x+\frac{1}{2}\left(-\frac{1}{2}\right)\frac{x^2}{2!}+\frac{1}{2}\left(-\frac{1}{2}\right)\left(-\frac{3}{2}\right)\frac{x^3}{3!}+\cdots. \quad (5)$$

附录 三次方程的三角解法

在三次方程

$$a_3x^3+a_2x^2+a_1x+a_0=0, \quad a_3\neq 0 \quad (6)$$

的情况下,方程实根可按下法求得. 我们用 a_3 去除方程各项把(6)化简成 $a_3=1$ 的情形. 现在作变量替换 $x=y-\frac{a_2}{3}$,并移动常数项,把(6)化为

$$y^3+py=q. \tag{7}$$

当 $p=0$ 时，答案立即可得.

否则，令 $y=hz$，并用 k 乘(7)的各项，其中 $h=\sqrt{\frac{4|p|}{3}}$，$k=\frac{3}{h|p|}$，我们可把(7)化为下列两个方程之一：

$$4z^3+3z=C \quad 或 \quad 4z^3-3z=C. \tag{8}$$

为了解第一个方程，我们可用熟悉的三角恒等式

$$\mathrm{sh}3\theta=4\mathrm{sh}^3\theta+3\mathrm{sh}\theta,$$

因此，

$$z=\mathrm{sh}\left(\frac{1}{3}\mathrm{Ar\,sh}C\right). \tag{9a}$$

为了解第二个方程，当 $C\geqslant1$，我们利用类似的公式

$$\mathrm{ch}3\theta=4\mathrm{ch}^3\theta-3\mathrm{ch}\theta,$$

得到

$$z=\mathrm{ch}\left(\frac{1}{3}\mathrm{Ar\,ch}C\right). \tag{9b}$$

当 $C\leqslant-1$，改变 z 的符号后再应用同样的方法求解. 为了解当 $|C|<1$ 时的第二个方程（这就是 § 15.8 的不可约情形），利用相似的公式

$$\cos3\theta=4\cos^3\theta-3\cos\theta,$$

得到

$$z=\cos\left(\frac{1}{3}\mathrm{Arc}\cos C\right). \tag{9c}$$

在这种情形下，z 取三个值，这是因为 $\frac{1}{3}\mathrm{Arc}\cos C$ 有三个值，它们之间相差 120° 的倍数.

习　题

1. 证明：每个正实数有实平方根.

2. 证明：对任意正实数 a 和任意整数 n，方程 $x^n=a$ 有且仅有一个正

实根$\sqrt[n]{a}$.

3. 证明: 对每个 $C>-\frac{3}{8}$, $x^4-x=C$ 有两个实根.

4. 利用正文中的(5)式和$\left(\frac{\sqrt{5}}{2}\right)^2=1+\frac{1}{4}$, 求$\sqrt{5}$的四位小数近似值.

5. 利用(5)式和$\left(\frac{5\sqrt{2}}{7}\right)^2=1+\frac{1}{49}$, 求$\sqrt{2}$的六位小数近似值.

6. 证明: 偶次首一多项式达到最小值 K, 并且对每个值 $C>K$, 多项式两次取值 C.

7. (a) 设 a 和 b 为正实数, $n\geqslant -1$ 为整数, 证明: 对一切充分大的正值 x, 有 $ax^{n+1}>bx^n$.

(b) 已知多项式具有正的首项系数, 求出一个实数 M, 使得对一切 $x>M$, 有 $p(x)>0$.

8. 证明推论 1.

9. 证明推论 2.

10. 求下列方程的实根(取小数三位):

(a) $3x^3-x=\frac{1}{9}$,

(b) $x^3-3x^2+6x=7$,

(c) $x^3+3x^2+2=0$.

*§4.5 戴德金分割

想象在 x 轴上, 有理数撒布在它们各自本来的位置上. 但是, 当分割 x 轴时(比如说, 用剪刀剪开), 我们就把全体有理数分成两类, 一类在左边, 记作 L, 一类在右边, 记作 U. 每个有理数落入这两类中的一类, 而仅当在点 $x=\frac{m}{n}$ 处分割 x 轴时, 有理数 $\frac{m}{n}$ 同时落在这两类中. 特别注意, 如果 x 在 L 中, 那么对 U 的每个 y, 有 $x\leqslant y$; 反过来, 如果对 U 中一切 y, 有 $x\leqslant y$, 那么 x 必落在 L 中. 由此引出戴德金(Dedekind)分割的想法.

一般地, 设 F 为任意有序域. 我们用 F 中的"戴德金分割"表

示适合下列条件的一对非空子集L和U:

(i) L是U的全体元素的所有下界的集合;

(ii) U是L的全体元素的所有上界的集合.

引理1 戴德金分割的L部分和U部分合在一起包含F的一切元素;它们至多有一个公共元素.

证明 设已知$x\in F$,如果对某$a\in L$,有$x\leqslant a$,那么对一切$y\in U$,有$x\leqslant a\leqslant y$,因此$x\in L$.否则,由三分律,对一切$a\in L$,有$x>a$,所以$x\in U$.这就证明了第一个结论:F的每个元素不在L中就在U中.再有,设a和b都既在L中又在U中,则$a\geqslant b$(因为$a\in U, b\in L$),并且$a\leqslant b$(因为$a\in L, b\in U$),因此$a=b$,这就证明了第二个结论.

如果L和U有一个公共元素a,则称该分割是通过a的.显然,如果L_a是所有适合$x\leqslant a$的x的集合,并且U_a是所有适合$x\geqslant a$的x的集合,那么分割(L_a, U_a)通过a.

戴德金分割公理 (在有序域F上)每个分割通过某元素a.

定理5 戴德金分割公理在有序域中成立当且仅当F是完备的有序域.

证明 设(L,U)是任意分割,如果最小上界的存在性是已知的,则L具有最小上界a.因为a是L的上界,所以a必在U中;因为它是最小上界,所以它是一切上界的下界,因此是U的所有元素的下界.根据分割定义,这意味着a在L中,所以给定的分割通过元素a.

反过来,假定戴德金分割公理成立,并设S为非空有界集合.设U是S的所有上界的集合,L是U的所有下界的集合(显然,L包含S).为证明(L,U)是一分割,我们只须确定U是L的所有上界的集合.但是根据L的构造,U的每个元素是L的上界(对一切$x\in L, y\in U$,有$x\leqslant y$);而因为L包含S,所以U包含L的一切上界.

现在根据戴德金公理，分割线(L,U)通过某元素 a，因为它是U的元素，所以它是S的上界，又因为它是L的元素，所以它是S的最小上界(即对一切 $x\in U$，有 $a\leqslant x$)．这就完成了证明．

我们现在概述一下实数公设"实数系是完备的有序域"有关分类性质的证明．

定理 6 任意两个完备的有序域同构．

证明 设 F'和 F'' 为任意两个这样的域，根据 § 2.6 定理 18 的推论 2，它们分别包含同构的"有理数"子域 $\mathbf{Q}'$ 和 $\mathbf{Q}''$．我们把 $\mathbf{Q}'$ 和 $\mathbf{Q}''$ 之间的同构(保持和与积，并保持次序的同构)扩张到 F' 和 F'' 之间的同构．

的确，每个 $a'\in F'$ 定义了 F' 中的一个分割，从而定义了 $\mathbf{Q}'$ (有理数子域)中的分割．但根据定理 3，a' 由 $\mathbf{Q}'$ 中这个分割所确定——并且 $\mathbf{Q}'$ 中每个分割(L_R,U_R)用这个方法确定$a'=\text{l.u.b.}\,L_R=\text{g.l.b.}\,U_R$．$\mathbf{Q}''$ 中分割的情况类似，因此 F' 和 F'' 的元素分别双射到 $\mathbf{Q}'$ 和 $\mathbf{Q}''$ 的分割．这种双射显然保持次序．

最后，F' 和 F'' 中的运算可由 $\mathbf{Q}'$ 和$\mathbf{Q}''$ 的那些运算定义，以便把 $\mathbf{Q}'$ 与 $\mathbf{Q}''$ 的同构扩张．更确切地说，设 a 和 b 分别对应于 $\mathbf{Q}'$ 中分割(L_a,U_a)和(L_b,U_b)．那么 $a+b$ 对应于分割①$(L_a+L_b,\ U_a+U_b)$，其中 L_a+L_b 是所有和 $x+y\,(x\in L_a,\ y\in L_b)$ 的集合，而 U_a+U_b 可类似地描述．把正元素 a 和 b 相乘，构成正有理数系中类似的分割．那么 ab 对应于分割 (L_aL_b,U_aU_b)，其中 L_aL_b 是所有积 $xy\,(x\in L_a,\ y\in L_b)$ 的集合，U_aU_b 也类似地定义．因为$(-a)b=a(-b)=-ab$ 和$(-a)(-b)=ab$，因此这可扩充到一切乘积，我们不再详细论述．

---

① 在某些情况下，$(L_a+L_b,\ U_a+U_b)$不会是分割，因为数 $a+b$ 不在L中也不在U中；但是，如果把遗漏的数添到L和U上去，我们便得到分割．类似的情况适合于下面的 L_aL_b．

反过来，我们可以利用分割通过整数或正整数构造实数. 我们首先证明全体有理数构成具有阿基米德性质(定理 2 中所指出的)的有序域. 用上段叙述的方式定义 **Q** 中分割的加法和乘法，我们可以证明 **Q** 中分割构成满足戴德金分割公理的有序域，因而给出完备的有序域. 但是证明很长，会把我们引入迷途，因此我们只是叙述一下结果.

定理 7 有一个且仅有一个(同构的域除外)完备的有序域.

不用戴德金分割，而通过有理数，把实数看作有理数序列的极限，也可以构造实数①.

习 题

1. 证明：如果 (L, U) 和 (L', U') 是有理数域中的分割，那么每个有理数(至多有一个例外)都能表为 $x+y$ ($x\in L$, $y\in L'$)，或者表为 $u+v$ ($u\in U$, $v\in U'$).

2. 叙述并证明对于正有理数在乘法下的类似于习题 1 的一个定理.

3. 为什么这个定理对于负有理数不成立?

4. 证明：对于每个 $\varepsilon>0$，存在充分大的 n 使得 $10^{-n}<\varepsilon$.

5. 有序域 F 中的戴德金分割有时定义为 F 的一对子集 L' 和 U'，它们适合：F 的每个元素或者在 L' 中或者在 U' 中，并且当 $x\in L'$，$y\in U'$ 时，有 $x<y$. 通过添加或删去相应的单个元素，可以证明：这种类型的每个分割给出正文中定义的分割 (L, U)，反之亦然.

6. 设 t 为有序整环 D 中的元素，$0<t<1$，证明：$s=2-t$ 具有性质 $s>1$, $st\leqslant 1$.

7. 设 D 为不同构于 **Z** 的完备的有序整环. 证明：D 包含适合 $0<t<1$ 的元素 t. 设 b 和 c 为 D 的任意正元素，证明：对某整数 n, $t^n b<c$.

*8. 利用习题 6 和习题 7 证明：任意完备的有序整环或者同构于 **Z**，或者同构于 **R**. (提示：求出 $b>1$ 的逆元素，考虑满足 $xb\leqslant 1$ 的所有的 x.)

9. (a) 证明：**R** 的任意自同构保持关系 $x\leqslant y$. (提示：$x\leqslant y$ 当且仅当

---

① 参看 C. C. MacDuffee, *Introduction to Abstract Algebra* (New York, Wiley, 1940)的第 VI 章的论述.

$z^2=y-x$ 有解.)

(b) 利用(a)证明: **R** 唯一的自同构是平凡同构 $x\mapsto x$.

*10. 证明: 如果 $D=F$ 为有序域, 并且对每个有理函数

$$R(x)=\frac{b_0+b_1x+\cdots+b_rx^r}{a_0+a_1x+\cdots+a_nx^n}\neq 0,\quad a_nb_r\neq 0,$$

我们规定 $R(x)>0$ 的意思是 $a_nb_r>0$, 那么 $F(x)$ 成为有序域.

*11. 证明: 在习题 10 中, $R(x)>0$ 当且仅当对 F 中一切充分大的 t, 有 $R(t)>0$.

第五章 复　　数

§5.1 复数的定义

如果我们把实数系 R 扩张成较大的复数域 C, 那么在解析函数论和微分方程论中,特别是在代数学中,很多代数定理的描述将更为简洁. 我们现在就来定义复数域,并且指出,如果我们想要使每个多项式方程都有根, 由实数域扩张而得到的域就是复数域.

定义 复数就是实数偶(x,y)——x 称为(x,y)的实分量,y 称为(x,y)的虚分量. 根据法则

$$(x,y)+(x',y')=(x+x',y+y'),\tag{1}$$

$$(x,y)\cdot(x',y')=(xx'-yy',xy'+yx'),\tag{2}$$

施行复数相加和相乘. 这样定义的复数系记作 C.

我们认为上面的定义不是靠神灵的力量, 而是通过简单的代数运算而得到的. 首先, 观察出方程 $x^2=-1$ 没有实根(x^2 决不能是负数). 这就暗示我们要引进一个虚数 i,它满足 $i^2=-1$, 此外还满足普通的代数定律. 用确切的话来说, 它提出一个表面上讲得通的假设: 存在一个包含元素 i 同时包含实数域 R 的整环 D.

在 D 中,任意形为 $x+yi$(x,y 为实数) 的表达式将表示一个元素. 此外,由整环的定义(普通的代数定律)有

$$(x+yi)\pm(x'+y'i)=(x\pm x')+(y\pm y')i,\tag{1'}$$

$$(x+yi)\cdot(x'+y'i)=xx'+(xy'+yx')i+yy'i^2.\tag{2'}$$

因为 $i^2=-1$,我们由(2')得

$$(x+yi)\cdot(x'+y'i)=(xx'-yy')+(xy'+yx')i.\tag{2''}$$

于是我们得到一个推论是, 由 R 和 i 生成的 D 的子整环包含一切

形为 $x+yi$ 的元素，而不包含其他任何元素.

再有，由 $x+yi=x'+y'i$ 推出 $x-x'=(y'-y)i$，因此两边平方得 $(x-x')^2=-(y'-y)^2$，又因 $(x-x')^2\geqslant 0$，$-(y'-y)^2\leqslant 0$，除非 $x=x'$，$y=y'$，上面等式不成立. 总之，不同的实数偶 (x, y) 确定 D 中不同的元素 $x+yi$. 这就建立了，$\mathbf{C}$ 中元素和由 $\mathbf{R}$ 与 i 生成的 D 的子整环中元素之间的一一对应 $(x, y)\leftrightarrow x+yi$. 比较公式 $(1')\sim(2')$ 和 $(1)\sim(2)$，我们看到这种对应保持和与积，因此是一个同构. 这就证明了

定理 1 *设 D 为包含实数系 $\mathbf{R}$ 和 -1 的平方根 i 的任意整环. 那么由 $\mathbf{R}$ 和 i 生成的 D 的子整环与 $\mathbf{C}$ 同构.*

我们现在证明我们的猜想，确实存在一个整环 D，它包含全体实数和 -1 的平方根.

定理 2 按上面定义的复数系是一个域，它包含一个与 $\mathbf{R}$ 同构的子域，并包含方程 $x^2+1=0$ 的根.

证明 对于实数偶 (x, y)，加法的交换律和结合律成立，$(0, 0)$ 是加法单位元素，$(-x, -y)$ 是 (x, y) 的加法逆元素，这些都是下述事实的直接结论：数偶的实分量和虚分量是独立相加的，而相应的定律对于它们都是成立的.

类似地，乘法的交换律和结合律成立，$(1, 0)$ 是乘法单位元素，每个 $(x, y)\neq(0, 0)$ 都有乘法逆元素

$$(x, y)^{-1}=\left(\frac{x}{x^2+y^2}, \frac{-y}{x^2+y^2}\right). \tag{3}$$

这可由 §5.2 中建立的事实得到，在 §5.2 中指出，几个复数相乘时，它们的"辐角"和"绝对值"是分开来进行运算的，这些运算本身满足交换律和结合律. 可是在这里，检验这些定律所采用的办法是直接代入定义(2)，只有结合律的计算比较冗长，我们略去了它们的详细验证.

最后，类似地直接代入定义，我们可以验证分配律. 设 $z=(x,y)$, $z'=(x',y')$, $z''=(x'',y'')$. 那么代入定义(1)和(2)，有

$$z(z'+z'')=(x,y)(x'+x'',y'+y'')$$
$$=(x(x'+x'')-y(y'+y''),x(y'+y'')+y(x'+x'')),$$
$$zz'+zz''=(xx'-yy',xy'+yx')+(xx''-yy'',xy''+yx'')$$
$$=(xx'-yy'+xx''-yy'',xy'+yx'+xy''+yx'').$$

从这两个表达式可以直接验证 $z(z'+z'')=zz'+zz''$.

在这个由数偶组成的域 $\mathbf{C}$ 中，我们利用定理 1 中所用过的对应 $(x,y)\leftrightarrow x+yi$，可以在 $\mathbf{C}$ 中找到一个实数子域. 按照这种对应，实数 x 对应于第二项为零的数偶，$(0,1)$ 对应于 i. 特别是，如果定义(1)和(2)中的第二个分量 y 和 y' 都是零时，那么第一个分量 x 和 x' 的相加和相乘恰好与实数 x 和 x' 的相加和相乘一样. 这正是我们所要认识的：对应 $x\leftrightarrow(x,0)$ 是实数域 $\mathbf{R}$ 到 $\mathbf{C}$ 的子域的一个同构. 在上面这种情况下，我们认为，每个这样特殊的复数 $(x,0)$ 只与相应的实数 x 等同.

最后，我们希望 -1 的平方根相当于数偶 $(0,1)$. 事实上，定义(2)的特殊情况表明，$(0,1)^2=(-1,0)=-1$. 因此我们定义 i 是数偶 $(0,1)$. 那么任意数偶 (x,y) 具有形式

$$(x,y)=(x,0)+(0,y)=(x,0)+(y,0)(0,1)=x+yi. \quad (4)$$

记号 $x+yi$ 是很方便的，后面我们都用它来代替 (x,y). 为简洁起见，我们还常常写作 $z=(x,y)=x+yi$, $w=(u,v)=u+vi$, $c=(a,b)=a+bi$，等等——换句话说，我们用单个字母表示复数，用字母表中紧靠着它的前两个字母分别表示这个复数的实分量和虚分量.

习　题

1. 验证复数乘法满足交换律和结合律.

2. 用公式(3)验证$(x, y)(x, y)^{-1}=(1, 0)$.

3. 解方程$(1, 1)(x, y)=(2, 1)$,

(a) 化为一对关于变量x, y的联立线性方程,

(b) 用公式(3).

4. 分别求出满足下列关系的复数$z=x+yi$和$w=u+vi$:

(a) $z+iw=1$, $iz+w=1+i$,

(b) $(1+i)z-iw=3+i$, $(2+i)z+(2-i)w=2i$.

5. 求出方程$z^2=-a$(a为任意正实数)的全部复根,并验证你的答案.

6. 描述由i和全体有理数生成的$\mathbf{C}$的子域.

7. 如果D是交换环,定理1还成立吗?给出详细证明.

8. (a) 证明: $z^2=a+bi$有解$x+yi$,其中$x=\left[\frac{a+\sqrt{a^2+b^2}}{2}\right]^{\frac{1}{2}}, y=\frac{b}{2x}$.

(b) 证明: 方程的解还可表成

$$y=\left[\frac{\sqrt{a^2+b^2}-a}{2}\right]^{\frac{1}{2}}, x=\frac{b}{2y}.$$

(注意,当a是负数,并且$\frac{b}{a}$很小时,这组公式在数值计算中更为精确.)

9. 方程$z^3+3iz=3+i$有一个根$-i$,计算另一个根,并表示成小数形式.

*10. 证明: 如果F为任意有序域,那么存在一个比它大的域F^*,包含着与F同构的子域和-1的平方根.

*11. 用定理1和定理2的方法,不借助于实数,证明: 有理数域$\mathbf{Q}$可以扩张到较大的域$\mathbf{Q}(\sqrt{2})$,该域包含$\mathbf{Q}$和2的平方根.

12. 证明: 不可能存在"正复数"的定义,使$\mathbf{C}$构成有序域.

§5.2 复平面

全体复数到笛卡儿平面的全体点上有一个基本的一一映射.即每个复数$z=x+yi$映射到点$P=(x, y)$上,这个点以z的实分量x为横坐标,以虚分量y为纵坐标.

极坐标可以用在这个平面上.我们回忆一下,平面上的每个点P,因此每个复数是由两个极坐标r和θ唯一确定的,这里r是

联结点P到原点的线段$\overline{Oz}$的长度（非负的），而θ是由x轴到线段$\overline{Oz}$的夹角（图1），所以

$$|z| = r = (x^2+y^2)^{\frac{1}{2}},$$

$$\arg z = \theta = \operatorname{arc\,tg}\frac{y}{x}. \qquad (5)$$

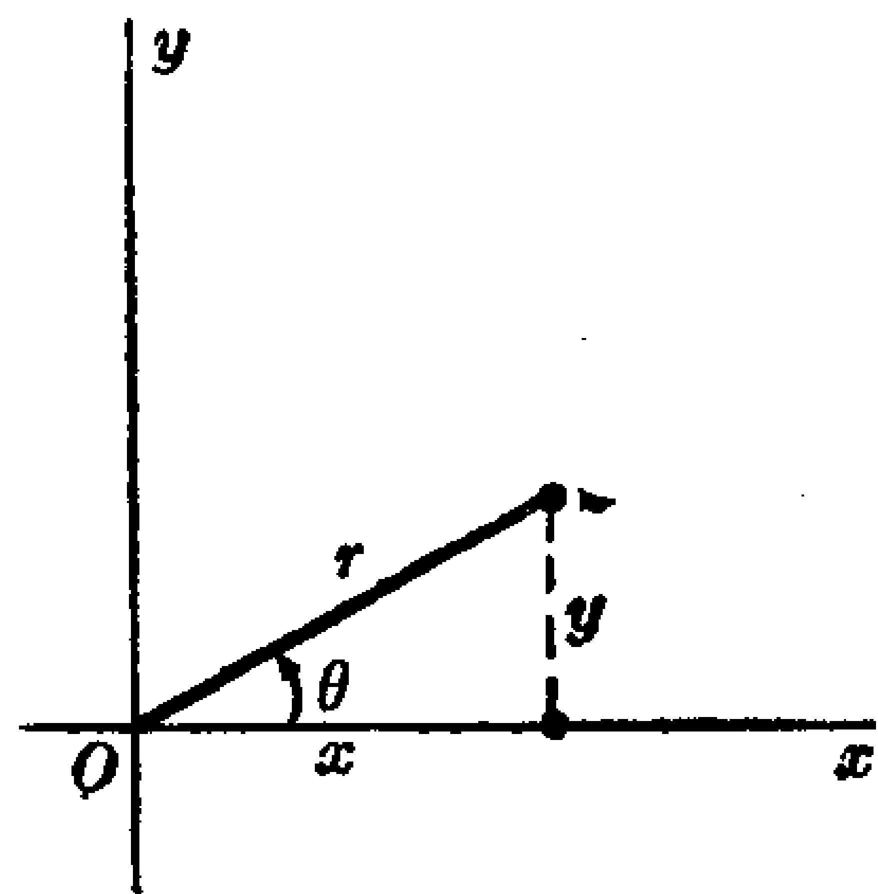


图 1

我们把r称为复数z的绝对值，把θ称为z的辐角. r和θ按下式确定x和y

$$x = r\cos\theta,\ \ y = r\sin\theta,\ \ z = r(\cos\theta + i\sin\theta). \qquad (6)$$

这就是通常由极坐标到直角坐标的变换公式. 我们还可以把（6）式写成$z = re^{i\theta}$的形式，这是因为，由通常的泰勒级数展开式得到

$$e^{i\theta} = 1 + i\theta + \frac{(-1)\theta^2}{2!} + \frac{(-i)\theta^3}{3!} + \cdots = \cos\theta + i\sin\theta.$$

绝对值和辐角的重要性主要反映在隶·莫弗(De Moivre)公式，这个公式叙述如下：

定理3 复数乘积的绝对值等于因子的绝对值之积，乘积的辐角等于因子的辐角之和，换句话说，

$$|zz'| = |z|\cdot|z'|,\ \ \arg zz' = \arg z + \arg z'. \qquad (7)$$

证明 因为按(6)式，有$z = r(\cos\theta + i\sin\theta)$，$z' = r'(\cos\theta' + i\sin\theta')$，代入定义(2)中我们得到

$$zz' = rr' = [(\cos\theta\cos\theta' - \sin\theta\sin\theta') + i(\cos\theta\sin\theta' + \sin\theta\cos\theta')];$$

由熟知的三角公式，这就是

$$zz' = rr'[\cos(\theta+\theta') + i\sin(\theta+\theta')].$$

这就给出了结论(7).

复数绝对值的乘法性质与加法性质(不等式)其表达形式同实数一样，即

$$|z|>0 \text{ 除非 } z=0, \quad |0|=0; \tag{8}$$

$$|z+z'| \leqslant |z|+|z'|. \tag{9}$$

为了证明这些，注意公式(1)意味着 $z+z'$ 可以通过画以 z, O 和 z' 为三个顶点的平行四边形（图 2）来求得，第四个顶点就是 $z+z'$. 由于复数的绝对值等于相应线段的几何长度，现在可以推出公式(8)和(9).

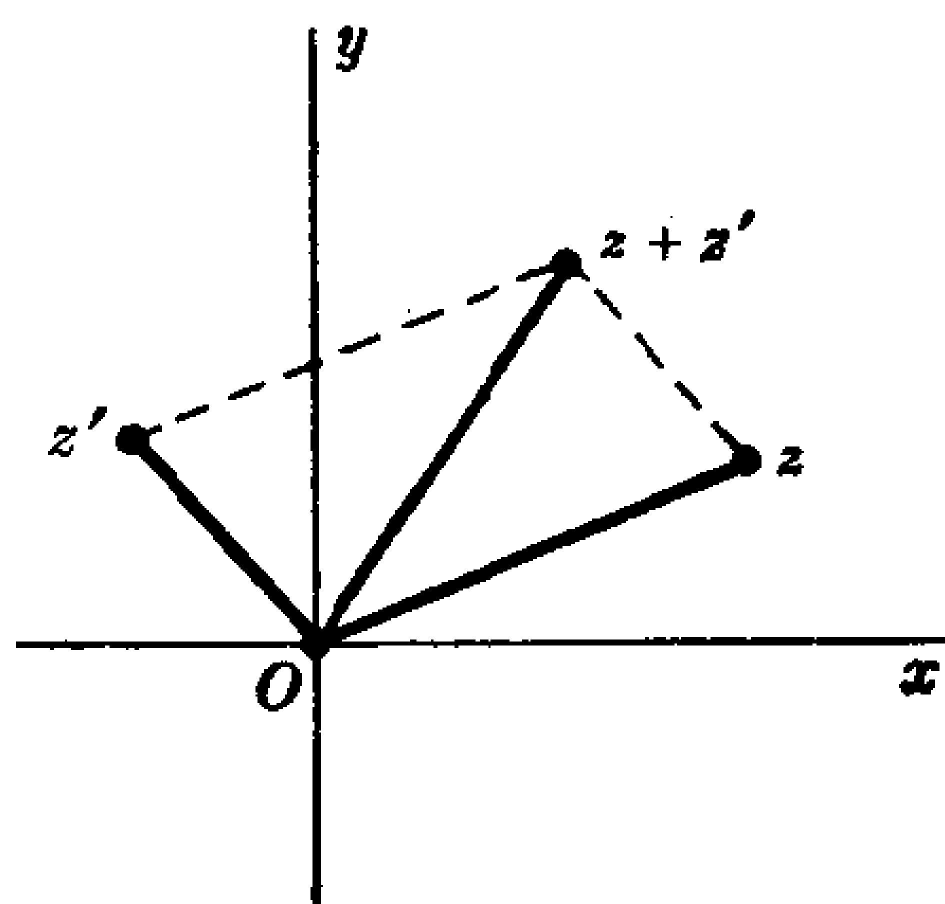


图 2

复 n 次单位根可以用三角方法求得. 从棣·莫弗公式(7)直接得出

$$[r(\cos\theta+i\sin\theta)]^{-1}=\frac{1}{r}[\cos(-\theta)+i\sin(-\theta)].$$

进一步得到，$z^n=1$ 当且仅当 $|z|^n=1$，并且 $n\cdot\arg z$ 是 2π 的整数倍 $2k\pi$. 因为 $|z|\geqslant 0$，所以 $|z|=1$. 因为 $\arg z$ 在 $0\leqslant\theta<2\pi$ 上是单值的，所以 $z^n=1$ 确有 n 个解. 在直角坐标中，它们是 1,

$$\cos\frac{2\pi}{n}+i\sin\frac{2\pi}{n}, \cdots, \cos\frac{2\pi(n-1)}{n}+i\sin\frac{2\pi(n-1)}{n}.$$

如果我们用 ω 表示 $\cos\frac{2\pi}{n}+i\sin\frac{2\pi}{n}$，则可得到这些 n 次单位根的另一种表示: $1, \omega, \omega^2, \cdots, \omega^{n-1}$. 用几何语言叙述就是

定理 4 全体复 n 次单位根是单位圆 $|z|=1$ 内接正 n 边形的 n 个顶点.

更一般地，考虑方程 $z^n=c$，其中 $c\neq 0$ 为任意复数. 在极坐标中，方程的一个解是

$$z_0=|c|^{\frac{1}{n}}(\cos\theta+i\sin\theta), \text{ 其中 } \theta=\frac{1}{n}\arg c.$$

此外，wz_0 是 $x^n=c$ 的根当且仅当 $c=(wz_0)^n=w^n z_0{}^n=w^n c$，因此 $w^n=1$. 于是 c 的 n 次根是 $z_0, \omega z_0, \omega^2 z_0, \cdots, \omega^{n-1}z_0$，这里 ω 是上面定义的复 n 次单位根. 特别，它们也可以用正多边形的 n 个顶点表示.

对 $c=a+bi$ 的 n 次根 $z_0, \omega z_0, \omega^2 z_0, \cdots, \omega^{n-1}z_0$，我们可以借助于三角函数表和对数表，很容易地计算出它们的数值. 从恒等式

$$\log|z_0|=\log|c|^{\frac{1}{n}}=\frac{1}{n}\log(a^2+b^2)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{2n}\log(a^2+b^2)$$

出发，我们可以计算$|z_0|$. 根据隶·莫弗公式(7)，有 $\arg z_0=\frac{1}{n}\operatorname{arc\,tg}\frac{b}{a}$，和 $\arg\omega^k z_0=\frac{1}{n}\operatorname{arc\,tg}\frac{b}{a}+\frac{360k}{n}$. 这里的单位是度. 最后由公式

$$z=r(\cos\theta+i\sin\theta)=|z|\cos(\arg z)+i|z|\sin(\arg z)$$

完成计算.

每个复 n 次单位根 ω 满足一个有理数域上不可约的有理系数多项式方程. 这些方程称为“分圆”方程，在方程式理论中起着重要的作用.

由定义，每个 n 次单位根满足方程 $z^n-1=0$. 此外，除了 $z=1$ 的其他所有根满足

$$q_n(z)=\frac{z^n-1}{z-1}=z^{n-1}+z^{n-2}+\cdots+z+1=0. \tag{10}$$

在§3.10 中用爱森斯坦判别准则证明了当 $n=p$ 是素数时，$q_p(z)$ 是不可约的.

如果 n 不是素数，那么情况就复杂了. 例如，当 $n=4$，$z^3+z^2+z+1=(z+1)(z^2+1)$是可约的. 一般地，我们可以从(10)中分解出 k 次单位根所满足的分圆多项式，这里 k 取遍 n 的所有真因子. n 次单位根，如果对所有的 $k<n$，它不是 k 次单位根，则称它

为 n 次本原单位根.（例如，四次本原单位根是 i 和 $-i$.）n 次本原单位根是 ω^m，其中 m 与 n 互素，它们都满足有理数域上同一个不可约方程. 但是这一结论的证明和这个方程次数的计算，需要更多的数论知识.

习　题

1. 用隶·莫弗公式证明复数乘法的交换律和结合律、以及乘法逆元素的存在性.

2. 描述对应关系 $z \mapsto zi$ 的几何意义.

3. 求三次单位根和五次单位根的实分量与虚分量，计算到小数点后四位（用三角函数表）.

4. 求 $2+2i$ 的立方根和四次根，计算到小数点后四位.

5. 列出全部 12 次本原单位根，并在图纸上把它们画在一个大单位圆上.

6. 用几何语言描述变换 $z \mapsto cz+d\ (c, d \in \mathbf{C},\ c \neq 0)$ 的效果. 当 $|c|=1$ 时是什么情况？（提示：使用"平移"、"旋转"和"放大"等词.）

7. 找出 z^6-1 在有理数域 $\mathbf{Q}$ 上的不可约因子.

8. (a) 证明：$\omega=\cos\frac{2\pi}{n}+i\sin\frac{2\pi}{n}$ 是 n 次本原单位根.

(b) 证明：ω^m 是 n 次本原单位根当且仅当 m 与 n 互素.

§5.3　代数基本定理

我们在 §5.1 中看到，实数系 $\mathbf{R}$ 添加方程 $z^2+1=0$ 的一个虚根 i 就得到复数系. 但是为什么就到此为止了呢？为什么不打算添加其他多项式方程的"虚"根以便得到更大的域呢？所谓代数基本定理就回答了这个问题：一旦添加上 i，那么每个多项式方程就必有（复）根，所以为解方程我们就不需要再选另外的虚根.

定理 5（欧拉-高斯）　每个正次数的复系数多项式必有复根.

已经知道这个著名定理的很多证明方法①.所有的证明都包含着象第四章引进的那些非代数概念;这里我们选择了一个证明,它的非代数部分在直观上好象特别容易说明.我们不从第四章有关的公理来详细证明非代数部分.

证明 因为多项式

$$p(z)=a_m z^m+a_{m-1}z^{m-1}+\cdots+a_0,\text{ 其中 } a_m\neq 0$$

与多项式

$$q(z)=z^m+\frac{a_{m-1}}{a_m}z^{m-1}+\cdots+\frac{a_0}{a_m}$$

$$=z^m+c_{m-1}z^{m-1}+\cdots+c_0$$

有相同的根,所以只须讨论首项系数为 1 的情况.

这种情况下,我们画两个复平面,一个标记为"z-平面",另一个标记为"w-平面".已知函数 $q(z)$ 把 z-平面的每个点 $z_0=(x_0, y_0)$ 映射到 w-平面的点 $w_0=q(z_0)$ 上.此外,如果 z 描绘 z-平面上的一条连续曲线,那么 $q(z)$ (是可微的) 将描绘 w-平面上的一条连续曲线.我们的目的是证明,w-平面的原点 O 是 z-平面上某个点 z 的"象"$q(z)$,或者与之同样的是证明 z-平面上某个圆的象通过 w-平面的原点 O.

对每个固定的 $r>0$,函数 $w=q(re^{i\theta})$ 确定了 w-平面上的一条闭曲线 γ'_r,即 z-平面上以原点 O 为中心,r 为半径的圆 γ_r: $|z|=r\,(z=re^{i\theta})$ 的象.对每个固定的 r,考虑线积分②

---

① 例如参见, L. E. Dickson, *New First Course in the Theory of Equations* (New York: Wiley, 1939), 附录,或 L. Weisner, *Introduction to the Theory of Equations* (New York: Macmillan, 1938), p. 145.

② 在证明线积分的存在时,必须用到 R 的完备性.恒等式

$$d(\arg w)=\frac{u\,dv-v\,du}{u^2+v^2}$$

成立是因为 $\arg w=\operatorname{arctg}\frac{v}{u}$.

$$\phi(r,\theta)=\int_0^\theta d(\arg w)=\int_0^\theta \frac{udv-vdu}{u^2+v^2},$$

这是对任何不通过原点 $w=0$ 的曲线 γ_r' 来定义的.(如果 γ_r' 通过 $w=0$, 那么定理 5 的结论就立即可得.)几何上显然有 $\phi(r,2\pi)=2\pi n(r)$, 这里分支数 $n(r)$ 是曲线 γ_r' 绕原点反时针旋转的次数. 例如, 在图 3 中描绘的曲线, 其 $n(r)=2$.

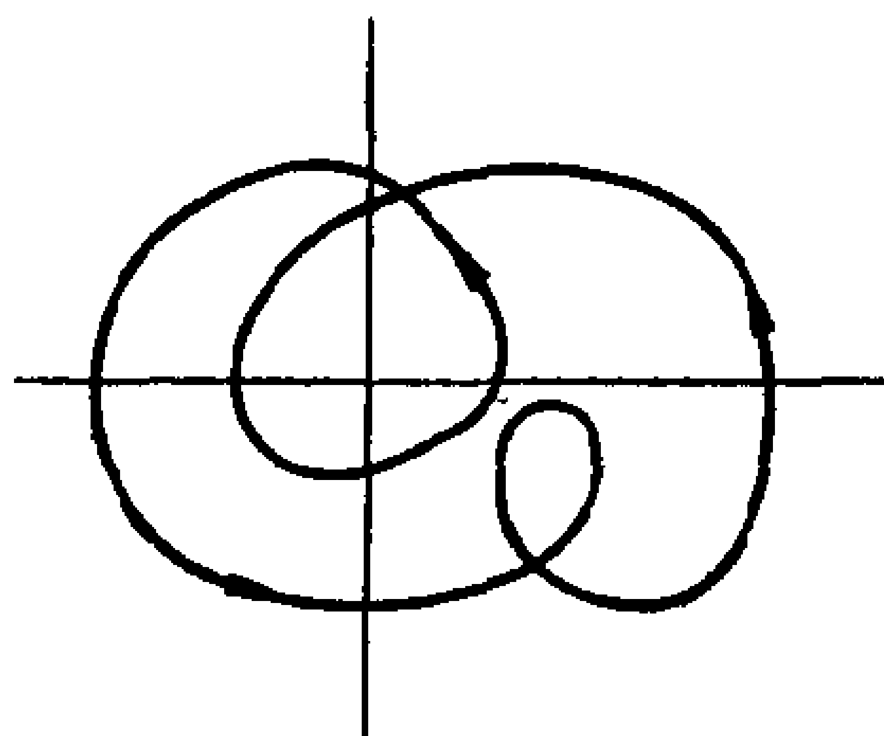


图 3

现在考虑 $n(r)$ 随 r 的变化情况. 因为 $q(re^{i\theta})$ 是连续函数, 所以除了 γ_r' 通过原点外, $n(r)$ 也是随 r 连续变化的. 再有, $n(0)=0$(除非 $c_0=0$, 这时 0 是方程的根). 现在假定 $c_0\neq 0$, 我们将证明, 当 r 充分大时, $n(r)$ 就是 $q(z)$ 的次数 m. 实际上, 设

$$q(z)=z^m+c_{m-1}z^{m-1}+\cdots+c_1z+c_0$$
$$=z^m\left(1+\sum_{k=1}^{m}c_{m-k}z^{-k}\right).$$

根据棣·莫弗公式(7), 有

$$\arg q(z)=m\arg z+\arg\left(1+\sum_{k=1}^{m}c_{m-k}z^{-k}\right).$$

因此, 当 z 沿着圆 γ_r 作反时针方向变化一周时, $\arg q(z)$ 得到的改变量是 $\arg z$ 的改变量的 m 倍(即 $m\cdot 2\pi$)加上 $\arg\left(1+\sum_{k=1}^{m}c_{m-k}z^{-k}\right)$ 的改变量. 可是当 $|z|=r$ 充分大时, 由公式(8)和(9)可知

$$1+\sum_{k=1}^{m}c_{m-k}z^{-k}=u$$

停留在圆 $|u-1|<\frac{1}{2}$ 中, 因此绕原点只转了零次(画个图加以解释).

我们得出结论：当 r 充分大时，$n(r)=m$，$\arg q(z)$ 的总改变量是 $2\pi m$. 但是当 r 变化时，γ_r' 是连续变形的 (因为 $q(z)$ 是连续的). 然而，几何上显然有①，一条绕原点 $m(\neq 0)$ 次的曲线，如果不是它变形的某一步通过原点，这条曲线就不能连续地变形成一点. 由此推出，对某个 r，γ_r' 必通过原点，这就出现 $q(z)=0$！ 证毕

作为推论，我们注意，如果 $p(z_1)=0$，那么根据余数定理 (§3.5)，我们可以写成 $p(z)=(z-z_1)r(z)$. 如果 $p(z)$ 的次数为 m，$m>1$，则商式 $r(z)$ 具有正次数，因此它也有一个复根 $z=z_2$. 如此进行下去，我们就找到 $p(z)$ 的 m 个线性因子，如

$$p(z)=c(z-z_1)(z-z_2)\cdots(z-z_m). \tag{11}$$

由此得到，**C** 上的不可约多项式只能是线性的. 这个推论和第三章的唯一因子分解定理合在一起得出

定理 6 任意复系数多项式可按一种且仅按一种方式写成(11)的形式.

在(11)中 $p(z)$ 的根显然是 $z_1, \cdots, z_m$，这是因为乘积为零当且仅当它其中一个因子为零. 如果因子 $(z-z_i)$ 重复出现，那么它重复出现的次数称为根 z_i 的**重数**. 在微积分学中，这个可以定义为 $p(z)$ 在 z_i 点为零的"阶数"：使得 $p(z)$ 和它的前 $\nu-1$ 阶导数在 z_i 点都为零的最大整数 ν.

习 题

1. 不用 §3.8 一般的唯一性定理，证明：分解式(11)的唯一性.

2. 证明：任何有理复函数，如果对所有的 z 都取有限值，则它是多项式.

3. 所有复数偶 (w, z)，当相加和相乘遵循法则(1)和(2)时，它构成含有单位元素的交换环吗？构成域吗？

---

① 这作为平面拓扑学中的一个定理已经证明了. 例如参看 S. Lefschetz, *Introduction to Topology* (Princeton University Press, 1949), p. 127.

4. 证明：任意二次多项式可以通过 $\mathbf{C}[z]$ 的适当的自同构得到形式 $cz(z-1)$ 或 cz^2.

5. (a) 用马克劳林(Maclaurin)级数证明公式 $e^{ix}=\cos x+i\sin x$.

(b) 证明每个复数可以写成 $re^{i\theta}$.

(c) 推导恒等式

$$\cos z=\frac{e^{iz}+e^{-iz}}{2}, \qquad \sin z=\frac{e^{iz}-e^{-iz}}{2i}.$$

6. 利用部分分式证明：域 $\mathbf{C}$ 上的任意有理函数可以写成一个多项式加上一些有理函数之和，这些有理函数的分子是常数，分母是线性函数的幂.

7. 分解 $z^2+z+1+i$.

§5.4 共轭数与实多项式

在复数域 $\mathbf{C}$ 上，方程 $z^2=-1$ 有两个根 i 和 $-i=0+(-1)i$. 对应 $x+yi\mapsto x+y(-i)=x-yi$ 把第一个根映射到第二个根，反过来把第二个根映射到第一个根，而它们保持所有实数不变. 而且这个对应把和映射到和，把积映射到积，这可以通过直接代入公式(1)和(2)或者应用定理 1 来验证. 换句话说，这个对应是 $\mathbf{C}$ 的一个自同构($\mathbf{C}$ 到自身的同构).

我们可以更简洁地把这个对应叙述如下. 把数 $x-yi$ 称为复数 $z=x+yi$ 的“共轭”z^*. 对应 $z\mapsto z^*$ 是 $\mathbf{C}$ 上周期为 2 的自同构，这因为

$$(z_1+z_2)^*=z_1^*+z_2^*, \quad (z_1z_2)^*=z_1^*z_2^*, \quad (z^*)^*=z. \tag{12}$$

在几何上这个对应相当于复平面关于 x 轴的一个反射；与其共轭相等的数只有实数.

共轭复数在数学中和物理学中(特别在波动力学中)是很有用的. 在使用它们的时候，记住下面一些简单公式是方便的：

$$|z|^2=zz^*, \quad z^{-1}=\frac{z^*}{|z|^2}.$$

用这些公式可使我们从定理 6 很容易地推出实系数多项式的

分解定理.

引理 实系数多项式的非实复根是以一对共轭复数的形式出现.

这推广了下面熟知的事实：二次多项式 ax^2+bx+c，当判别式 $b^2-4ac<0$ 时，有两个共轭复根 $x=\dfrac{-b\pm\sqrt{b^2-4ac}}{2a}$.

证明 设 $p(z)$ 为已知多项式，我们可以把它写成 (11) 的形式，其中 z_i 是复数（不是通常的实数）. 因为作用在这些根 z_i 上的一个对应 $z_i\mapsto z_i^*$ 是自同构，所以它把 $p(z)$ 映射到另一个多项式

$$p^*(z)=c^*(z-z_1^*)(z-z_2^*)\cdots(z-z_m^*).$$

这个多项式的每个系数是 $p(z)$ 中相应系数的共轭. 但因 $p(z)$ 的全体系数都是实数，所以 $p(z)=p^*(z)$. 因此分解式 (11) 是唯一的，$c=c^*$ 是实数，并且 z_i 是实数或者是成对出现的共轭复数.

定理 7 任意实系数多项式可以分解成（实）线性多项式和判别式为负的（实）二次多项式.

证明 上面引理中的实根 z_i 给出（实）线性因子 $(z-z_i)$. 一对共轭复根 $a+bi$ 和 $a-bi\,(b\neq0)$ 可以合起来有

$$[z-(a+bi)][z-(a-bi)]=z^2-2az+(a^2+b^2),$$

它给出 $p(z)$ 的一个实系数二次因子，其判别式为

$$4a^2-4(a^2+b^2)=-4b^2<0.$$

证毕

反过来，线性多项式和判别式为负的二次多项式在实数域上是不可约的（后者是因为它们只有复数根，因此没有线性因子）. 定理 7 所描述的因子分解是唯一的，这可作为一个推论.

习　题

1. 解方程:

(a) $(1+i)z+3iz^*=2+i$,

(b) $zz^*+2z=3+i$.

(c) $zz^*+3(z-z^*)=4-3i$.

2. 解方程:

(a) $zz^*+3(z+z^*)=7$,

(b) $zz^*+3(z+z^*)=3i$.

3. 解联立方程:

$$\begin{cases} iz+(1+i)w=3+i, \\ (1+i)z^*-(6+i)w^*=4. \end{cases}$$

4. 给出§4.4定理4推论2的独立的证明.

5. 证明: 如果我们在实数系上添加一个任意非线性不可约的实系数多项式的虚根,则可得到一个与 $\mathbf{C}$ 同构的域.

6. 证明: 在任意有序域上, 如果 $b^2-4ac<0$, 则 ax^2+bx+c 是不可约的.

7. 证明: 保持所有实数都不变的 $\mathbf{C}$ 的每个自同构或者是恒等自同构 $(z\mapsto z)$, 或者是自同构 $z\mapsto z^*$.

*§5.5 二次方程与三次方程

§5.3中我们证明了任意复系数多项式根的存在性,但没有指出如何有效地把根计算出来. 在§5.5和§5.6中, 我们将指出如何计算二次方程、三次方程和四次方程的根. 计算过程中只包含四种有理运算(加、乘、减、除)和开 n 次方根运算. §5.1和§5.2中我们已指出如何进行复数的这些运算. 下面讲的计算过程也可用于任何别的域上, 在这些域上, 任意元素的 n 次根是可以构造的,而且 $1+1\neq 0$, $1+1+1\neq 0$.

二次方程可以用中学代数的“配方”方法求解. 方程

$$az^2+bz+c=0, \quad (a\neq 0) \tag{13}$$

等价于(具有同样的根)较简单的方程

$$z^2+Bz+C=0, \quad \left(B=\frac{b}{a}, \quad C=\frac{c}{a}\right). \tag{14}$$

如果令 $w=z+\frac{B}{2}\left(即\ z=w-\frac{B}{2}\right)$，以便配成完全平方，我们可以看到(14)式等价于

$$w^2=\frac{B^2}{4}-C. \tag{15}$$

对 w, B, C 代回 z, a, b, c, 这就得出

$$z=w-\frac{B}{2}=\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a} \tag{16}$$

根据 § 5.2, 所以有两个解.

三次方程可以类似地求解. 首先象 § 4.4 那样，把三次方程化为形式

$$z^3+pz+q=0, \tag{17}$$

然后做维特(Vieta)变换 $z=w-\frac{p}{3w}$，结果得到(有些项已消去)

$$w^3-\frac{p^3}{27w^3}+q=0. \tag{18}$$

用 w^3 乘以各项，我们得到关于 w^3 的二次方程. 这个方程可以根据公式(16)求解，得出

$$w^3=-\frac{q}{2}+\sqrt{\frac{q^2}{4}+\frac{p^3}{27}} \quad (两个值). \tag{19}$$

这给出 w 的 6 个三次根形式的解. 把这些解代入公式 $z=w-\frac{p}{3w}$，我们就得到 z 的三对解，成对的两个解是相等的.

阐述一下前面定理 6 中的公式是有趣的. 例如，二次多项式的情形，记

$$z^2+Bz+C=(z-z_1)(z-z_2),$$

我们有

$$z_1+z_2=-B,\quad z_1z_2=C,\quad 因而 (z_1-z_2)^2=B^2-4C. \tag{20}$$

$B^2-4C=D$ 这个量是 (14) 的判别式. 用原来 (13) 式中的系数表

示， $D=\frac{b^2-4ac}{a^2}$.

类似地，设 z_1, z_2, z_3 是简化的三次方程(17)的根，则

$$z_1+z_2+z_3=0,\quad z_1z_2+z_2z_3+z_3z_1=p,\quad z_1z_2z_3=-q. \tag{21}$$

合并前两个关系式，我们得到公式

$$\begin{gathered} p=z_1z_2-z_3^2,\quad (z_1-z_2)^2=-4p-3z_3^2, \\ z_1^2+z_2^2+z_3^2=-2p. \end{gathered} \tag{22}$$

我们现在用

$$D=\prod_{i<j}(z_i-z_j)^2=P^2,$$

$$\text{这里}\ P=(z_1-z_2)(z_2-z_3)(z_1-z_3) \tag{23}$$

来定义三次方程的判别式. 把 P 平方，再利用(22)式的第二个关系式，通过一些计算后我们就得到

$$D=-4p^3-27q^2, \tag{24}$$

它可以用来简化(19)，得 $w=-\frac{q}{2}+\frac{\sqrt{-D}}{6}$.

定理8 实系数二次方程或三次方程，如果它的判别式非负，则它有实根；如果它的判别式是负的，则它有两个虚根.

证明 根据定理 7 的推论，或者所有的根都是实根，或者有两个共轭虚根 $z_1=x_1+yi$ 和 $z_2=x_1-yi$. 如果所有的根都是实的，则对所有 $i\neq j$，有 $(z_i-z_j)^2\geqslant 0$，因此 $D\geqslant 0$. 对第二种情况，有 $(z_1-z_2)^2=-4y^2<0$，又因为 $z_3=x_3$ 是实的，所以 $(z_1-z_3)(z_2-z_3)=(x_1-x_3)^2+y^2>0$，因此 $D<0$. 证毕

由(23)式，条件 $D=0$ 给出了检验方程有重根的简单判别法.

可惜的是，在 $D>0$ 的情况中，方程 $z^3+pz+q=0$ 的三个根全部是实根，但公式(19)却是用复数把它们表示出来. 我们在 § 15.6 中将指出这是毫无助益的.

习　题

1. 证明：对任意复数 y, p，存在 z 满足 $y=z-\frac{p}{3z}$. 存在多少个 z?

2. 用根式表出方程的解:

   (a) $z^2+iz=2$,

   (b) $z^3+3iz=1+i$,

   (c) $z^3+3iz^2=10i$.

3. 把习题 2(a)～(c)每个方程中的一个根改写成小数形式.

4. (a) 证明(22)式.　　　　(b) 证明(24)式.

*5. (a) 证明: $\mathrm{sh}3\gamma=\mathrm{sh}(3\gamma+2\pi i)$.

   (b) 利用§4.4中的公式(9a)证明: 方程 $4z^3+3z=C$ 除有实根 $\mathrm{sh}\left[\frac{1}{3}\mathrm{Arsh}\,C\right]=\mathrm{sh}\gamma$ 外，还有复根 $-\frac{1}{3}\mathrm{ch}\gamma\pm\frac{i\sqrt{3}}{2}\mathrm{sh}\gamma$.

6. 设 $\omega=e^{\frac{2\pi i}{5}}$ 是五次本原单位根，且设 $\zeta=\omega+\frac{1}{\omega}$.

   (a) 证明: $\zeta^2+\zeta=1$.

   (b) 推断: 中心在(0, 0)，一个顶点在(1, 0)的一个正五边形中，与这个顶点相邻的顶点的 x 坐标是 $\frac{\sqrt{5}-1}{4}$.

7. 用公式 $\cos\theta=\frac{e^{i\theta}+e^{-i\theta}}{2}$ 证明: $\cos n\theta=T_n(\cos\theta)$，其中 T_n 为一个适当的 n 次多项式，并计算 T_1, T_2, T_3, T_4.

*§5.6　四次方程的根式解法

任何一种把代数方程的求解化为一系列有理运算和对某数开 n 次方根的运算的方法称为“根式解法”.

定理 9　*任意 $n\leqslant 4$ 次实系数或复系数多项式方程可用根式求解.*

证明　因为 $n=1$ 的情形在任意域上都是可解的，而 $n=2, 3$ 的情形在§5.5中已作了处理，所以我们只须考虑

$$ax^4+bx^3+cx^2+dx+e=0, \qquad (a\neq 0).$$

再有，用 a 去除每一项，并用 $z=x+\frac{b}{4a}$ 代替 x(以便配成“完全”四次方)，我们得到方程

$$z^4+pz^2+qz+r=0, \tag{25}$$

它的根与原方程的根相差 $\frac{b}{4a}$. 但是，对所有的 u，(25)式等价于

$$z^4+z^2u+\frac{u^2}{4}-z^2u-\frac{u^2}{4}+pz^2+qz+r=0, \tag{26}$$

或 $$\left(z^2+\frac{u}{2}\right)^2-\left[(u-p)z^2-qz+\left(\frac{u^2}{4}-r\right)\right]=0.$$

第一项是一个完全平方 P^2，这里 $P=z^2+\frac{u}{2}$. 方括号中的项当选取 u 满足(相当于判别式等于零)

$$q^2=4(u-p)\left(\frac{u^2}{4}-r\right) \tag{27}$$

时，是一个完全平方 Q^2. 应用定理 8，这个关于 u 的三次方程可用根式求解. 如果(25)式的系数是实数，我们甚至可以证明，至少有一个实数 $u_1 \geqslant p$ 满足(27)式，这是因为，当 $u=p$ 时，(27)式的右边为零，并且当 $u>0$ 充分大时，(27)式的右边大于 q^2，或大于另一个任意预先给定的常数. 因此根据 § 4.4 定理 4，(27)式有所要求的实根 u_1.

把这个常数 u_1 代入 (26) 式，则 (25) 式的左边采取形式 $P^2-Q^2=(P+Q)(P-Q)$，或者

$$\left(z^2+\frac{u_1}{2}+Q\right)\left(z^2+\frac{u_1}{2}-Q\right), \tag{28}$$

这里

$$Q=Az-B, \quad A=\sqrt{u_1-p}, \quad B=\frac{q}{2A}. \tag{29}$$

(25)式的根显然是(28)式两个二次因子的根，后者可根据(16)式

求出. 注意，如果原方程的系数 a, b, c, d, e 都是实数，那么这两个因子也是实系数的.

回顾一下方程根式解法的历史是有意义的. 二次方程的求解由 Hindus 发现，而它的几何形式由希腊人给出(§ 4.1). 三次方程和四次方程的求解是由文艺复兴时期意大利数学家 Scipio del Ferro (1515)和 Ferrari (1545) 给出. 此外，十八世纪末，阿贝耳(Abel)和伽罗瓦(Galois) 证明了所有次数 $n \geqslant 5$ 的多项式方程用根式求解是不可能的.

习　题

1. 用根式求解 $z^4 - 4z^3 + (1+i)z = 3i$.
2. 不用代数基本定理证明：每个次数 $n<6$ 的实系数多项式有复根.
3. 解联立方程

$$\begin{cases} zw = 1+i, \\ z^2 + w^2 = 3-i. \end{cases}$$

*§ 5.7　稳定型方程

很多物理系统是稳定的当且仅当相应的多项式方程的全部根具有负的实部. 因此具有这种性质的方程称为“稳定型”方程.

在实二次方程 $z^2 + Bz + C = 0$ 的情形中，容易检验它的稳定性. 如果 $4C \leqslant B^2$，则两个根都是实数. 它们具有相同符号当且仅当 $z_1 z_2 = C > 0$，符号是负的当且仅当 $B = -(z_1 + z_2) > 0$. 如果 $4C > B^2$，则方程的根是两个共轭复数，它们两个具有负的实部 $x_1 = x_2$ 当且仅当 $B = -2x_1 = -2x_2 > 0$. 这种情形中也有 $C > \frac{B^2}{4} > 0$. 因此这两种情形的“稳定性”条件是 $B>0, C>0$.

在实三次方程 $z^3 + Az^2 + Bz + C = 0$ 的情形中，稳定性条件也不难找到.（当然，只考虑简化形式(17)还不够.）事实上，如果所

有的根具有负实部，那么，因为一个根 $z=-a$ 是实的，所以我们有分解式

$$z^3+Az^2+Bz+C=(z+a)(z^2+bz+c), \tag{30}$$

这里 $a>0$，并由上述情况知 $b>0$，$c>0$. 因此稳定性的必要条件是 $A=a+b>0$，$B=(ab+c)>0$ 和 $C=ac>0$. 此外 $AB-C=b(a^2+ab+c)>0$.

反之，假定 $A>0$，$B>0$，$C>0$，$AB-C>0$，并考虑实分解式(30)，根据定理 7 这个分解总是存在的. 因为 $ac=C>0$，所以 a 和 c 有相同的符号. 但是，如果它们两个都是负的，那么 b 必须是负的才能使 $ab+c>0$，因此 $A=a+b<0$，同假定矛盾. 因此有 $a>0$，$c>0$，并推出 $a^2+ab+c=a(a+b)+c>0$. 但是这就推出 $b=\dfrac{AB-C}{a^2+ab+c}>0$. 因此 (30) 式的两个因子是稳定的. 因此我们证明了下面结果

定理 10 实二次方程 $z^2+Bz+C=0$ 是稳定型方程当且仅当 $B>0$ 和 $C>0$. 实三次方程 $z^3+Az^2+Bz+C=0$ 是稳定性方程当且仅当 $A>0$，$B>0$，$C>0$ 和 $AB>C$.

习 题

1. 检验下列多项式的稳定性:

(a) z^3+z^2+2z+1.

(b) z^3+z^2+2z+2.

2. 证明: n 次首一实系数多项式是稳定型的，那么它的所有系数都必须是正的.

*3. 证明: 实系数多项式 $z^4+Az^3+Bz^2+Cz+D$ 是稳定型的当且仅当它的所有系数都是正的，并且 $ABC>A^2D+C^2$.

*4. 利用习题 3，求出复系数二次方程 $z^2+Bz+C=0$ 是稳定型方程的充分必要条件. (提示: 考虑 $(z^2+Bz+C)(z^2+B^*z+C^*)=0$.)

第六章　群

§6.1　正方形的对称

"对称"的概念对每个受过教育的人来说都是熟悉的，但是由对称产生的对称代数却只有少数人了解．我们将通过具体的正方形对称来引出这个代数．

我们设想一个正方形硬纸板放在有固定轴的平面上，使得正方形的中心落在坐标原点上，正方形的一个边是水平的．显然，这个正方形具有旋转对称：它通过下面的刚体运动可旋转成自身．

R:　　围绕中心 O 顺时针旋转 $90°$．

R', R''：以同样的方式旋转 $180°$ 和 $270°$．

这个正方形还有反射对称：它可以通过下面的刚体反射变为自身．

H：关于过原点 O 的水平轴的反射．

V：关于过原点 O 的垂直轴的反射．

D：关于 Ⅰ,Ⅲ 象限中的对角线的反射．

D'：关于 Ⅱ,Ⅳ 象限中的对角线的反射．

至此，我们列举的这些情形包括了七种对称．

对称代数起源于下述事实：我们通过相继完成两个运动可以把两个运动相乘．例如，乘积 HR 可分两步得到：首先把正方形关于水平轴反射，然后再把正方形顺时针旋转 $90°$．通过正方形硬纸板的实验，我们可以验证，HR 的最终效果与 D' 是一样的，这里 D' 是关于从左上角到右下角的对角线的反射．另一方面，等式 $HR=D'$ 可以通过观察正方形的每个顶点的变化来验证，如果等

式两边具有同一个效果，则等式成立．例如，在图 1 中，HR 是先通过 H 把 1 送到 4，然后通过 R 把 4 送到 3，因此就把 1 送到 3，这恰好与 D' 的效果一样．

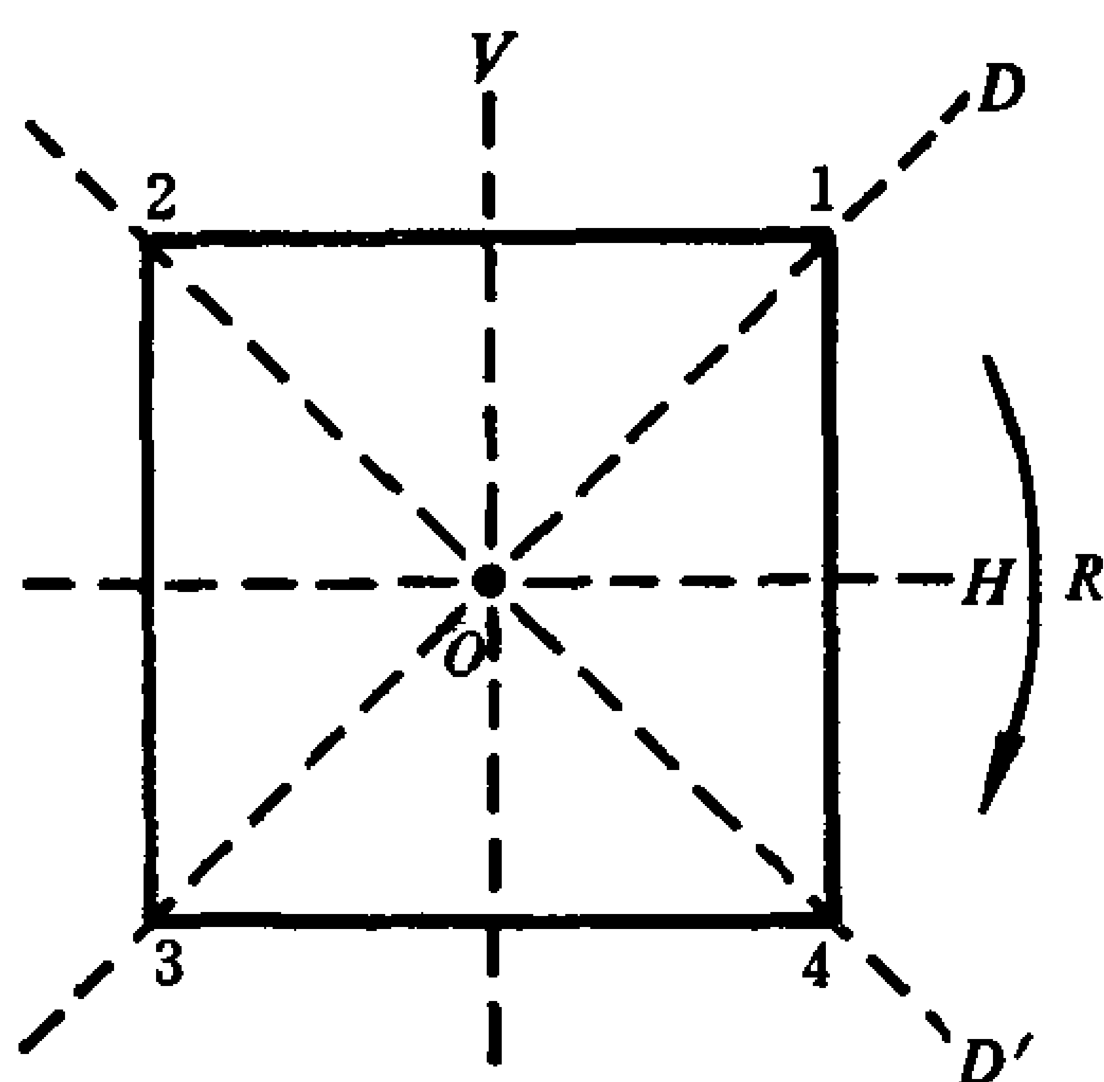


图 1

类似地，RH 定义为先顺时针旋转 90° 随后关于水平轴反射．（注意：图 1 的平面包含反射轴，这个平面可以想象成不随正方形而旋转．）

由计算表明 $RH=D\neq HR$，由此我们顺便得到这里所说的"乘法"一般不满足交换律！但是它满足结合律，我们在 §6.2 中将看到这一点．

读者计算正方形对称的其他乘积（§6.4 的表 1 中给出一个完整的乘法表）是有意义的．当你做完这些乘积之后将会发现，一般地，逐次地把任意两个对称乘起来便得到第三个对称，但有个例外，例如，当 R 和 R'' 相乘时，就会看到它的积是一个使正方形每个点都保持原来位置的运动，这就是所谓的"恒等"运动 I．这通常不被非数学家认为是对称；尽管如此，为了能使所有的对称两两相乘，我们还是把 I 看作一个（退化的）对称．

一般地，根据定义，几何图形的对称是图形上的点保持距离不变的一一变换．容易看出，正方形的任意对称一定把顶点 1 变换到四个可能的顶点之一，而且对每个这样的选择正好有两个对称．于是总共只有八个对称，就是我们已经列出来的那些．

不仅正方形，而且每个正多边形和正多面体（例如立方体和正二十面体）都存在有趣的对称群，可以用上面概述的初等方法找到．

类似地，很多装饰品有有趣的对称．例如我们考虑一个无限长的装饰图案



在这个图案中，箭头是沿着直线以一英寸间隔均匀分布的．这个图形的三个简单的对称是：T，向右平移一英寸；T'，向左平移一英寸；H，图形关于水平轴反射．其他对称（事实上是一切对称）可以由这三个对称反复相乘而得到．

习　题

1. 计算 $HV, HD', D'H, R'D', D'R', R'R''$.
2. 在"箭头"装饰图案中，描述对称 TH 和 HT.
3. 列出等边三角形的所有对称，并计算五种具有代表性的乘积．
4. 列出普通矩形的所有对称，并计算它们的所有乘积．

*5. 正四面体有多少对称？正八面体有多少对称？画图说明．

*6. 证明：正文中的装饰图案的任意对称可通过 H, T 和 T' 反复相乘而得到．

§6.2 变 换 群

对称代数可以推广到无论什么元素的任意集合 S 的一一变换．虽然常常把集合 S 看作"空间"（例如平面或球），把 S 的元素看作"点"，并且把双射看作 S 的相对于适当性质的"对称"，然而在任何情况下，S 的双射还满足一些非平凡的代数定律．

为了理解这些定律，我们必须清楚地记住 §1.11 中给出的关于函数、单射、满射和双射的定义．为了重新解释它们，我们给出一些新的例子．同 §1.11 中一样，我们通常用缩写记号 xf 代替 $f(x)$（读作"x 通过 f 的变换"），用 xg 代替 $g(x)$，等等．

函数 $f(x)=e^{2\pi ix}$ 把实数域 $\mathbf{R}$ 映入复数域 $\mathbf{C}$，它的值域（象）

是单位圆. 类似地, $g(z)=|z|$是函数 $g:\mathbf{C}\to\mathbf{R}$, 它的象是所有非负实数的集合.

再有, 考虑下列整数环 $\mathbf{Z}$ 到自身的函数 $\phi_0:\mathbf{Z}\to\mathbf{Z}$ 和 $\psi_0:\mathbf{Z}\to\mathbf{Z}$:

$$n\phi_0=2n, \quad m\psi_0=\begin{cases}\frac{m}{2}, & \text{当 } m \text{ 为偶数},\\ 0, & \text{当 } m \text{ 为奇数}.\end{cases}$$

根据乘法消去律, ϕ_0 是一一的; 然而它的值域仅由偶数组成, 所以 ϕ_0 没有把 $\mathbf{Z}$ 变换到 $\mathbf{Z}$ 上. 另一方面, ψ_0 不是一一的, 这因为所有奇数都映射到零, 但是它把 $\mathbf{Z}$ 映到 $\mathbf{Z}$ 上, 于是 ψ_0 是满射, 而不是单射.

我们现在转到变换代数. 具有相同的定义域 S 和相同的取值域 T 的两个变换 $\phi:S\to T$ 和 $\phi':S\to T$, 如果它们作用到 S 的每一点上都有相同的效果, 则称它们相等, 即

$\phi=\phi'$ 的意思是, 对每个 $p\in S$, 有 $p\phi=p\phi'$. (1)

再定义两个变换 ϕ 和 ψ 的乘积或合成 $\phi\psi$ 为它们相继作用的结果, 先 ϕ 后 ψ, 然而这里应假定 ϕ 的取值域是 ψ 的定义域. 换句话说, 如果

$$\phi:S\to T, \psi:T\to U,$$

那么 $\phi\psi$ 是由等式 $p(\phi\psi)=(p\phi)\psi$ (2)

给出的由 S 到 U 中的变换, 式中规定 $\phi\psi$ 作用到任意点 $p\in S$. 特别是, S (到自身)的两个变换的乘积总是可以定义的. 我们现在只考虑这种情况, 只要假定所包含的乘积有定义, 下面证明的恒等式几乎所有都可以用于一般情况.

变换的乘法适合

结合律 $(\phi\psi)\theta=\phi(\psi\theta)$,

这里假定所包含的乘积都有定义. 直观上这是显然的: $(\phi\psi)\theta$ 和

$\phi(\psi\theta)$两者都是按照先ϕ后ψ最后θ的顺序作用的。正式地，对每个$p\in S$，我们有

$$p[\phi(\psi\theta)]\underset{\phi(\psi\theta)}{=}(p\phi)(\psi\theta)\underset{\psi\theta}{=}[(p\phi)\psi]\theta\underset{\phi\psi}{=}[p(\phi\psi)]\theta\underset{(\phi\psi)\theta}{=}p[(\phi\psi)\theta],$$

这里每步都依赖于乘法的定义(2)，也就是把定义(2)用到与每步相对应的等号下面标出的乘积上. 根据变换相等的定义(1)，这就证明了结合律$\phi(\psi\theta)=(\phi\psi)\theta$.

集合S上的恒等变换$I=I_S$是使S上每个点保持固定的变换$I:S\to S$. 代数上，这可叙述成等式

$$pI=p,\ 对每个\ p\in S. \tag{3}$$

从上面的定义，直接推出

同一律　　$I\phi=\phi I=\phi$，对一切ϕ.

为了验证这一点，我们注意，对所有的p，有$p(I\phi)=(pI)\phi=p\phi$，类似地，$p(\phi I)=(p\phi)I=p\phi$.

现在回到前面定义在集合$\mathbf{Z}$上的特殊变换ϕ_0和ψ_0，并计算它们的乘积. 显然

$$m\psi_0\phi_0=\begin{cases}m, & 当\ m\ 为偶数,\\ 0, & 当\ m\ 为奇数.\end{cases}$$

因此$\psi_0\phi_0\neq I$. 另一方面，对一切$m\in\mathbf{Z}$，有$m\phi_0\psi_0=m$，因此$\phi_0\psi_0=I$. 于是我们称ψ_0是ϕ_0的右逆元素(而不是左逆元素).

一般地，如果变换$\phi:S\to S$和$\psi:S\to S$具有$\phi\psi=I:S\to S$，那么称ϕ是ψ的*左逆元素*，而ψ是ϕ的*右逆元素*. 这些定义同以前定义的是"一一映入的(单射)"和"映上的(满射)"等概念有密切关系.

定理1　*变换$\phi:S\to S$是一一的当且仅当它有右逆元素，ϕ是映上的当且仅当它有左逆元素.*

证明　如果ϕ有右逆元素ψ，$\phi\psi=I$，并且$p\phi=p'\phi$，那么

$$p=p(\phi\psi)=(p\phi)\psi=(p'\phi)\psi=p'(\phi\psi)=p'.$$

于是由 $p\phi=p'\phi$ 可推出 $p=p'$,因此 ϕ 是一一的. 类似地, 如果 ϕ 有左逆元素 ψ',则 $\psi'\phi=I$. 因此 S 中的任何元素 q 都可写成

$$q=qI=q(\psi'\phi)=(q\psi')\phi,$$

这表明 q 是某一点 $p=q\psi'$ 的 ϕ-象. 因此 ϕ 是映上的.

反过来, 已知任意 $\phi:S\to S$, 我们首先如下构造第二个变换 $\psi:S\to S$. S 中有一些点,其中每个点 q 是 S 的一个或多个点 p 在 ϕ 之下的象, 对每个点 q, 在这些点 p 中任意选出① 一个点作为象 $q\psi$. 那么,对形为 $p\phi$ 的任何一个 q, 有

$$q(\psi\phi)=(q\psi)\phi=p\phi=q.$$

再令 ψ 随便按什么方式映射 S 中其余的点 q, 譬如说映射到 (非空)集合 S 的某个固定点上.

现在,如果 ϕ 是映上的,那么每个 q 都有形式 $p\phi$,因此 $\psi\phi=I$, 所以 ϕ 有 ψ 作为它的左逆元素. 另一方面,如果 ϕ 是一对一的,那么, 对每个 p, $(p\phi)\psi$ 一定是唯一的 p, 即上面所说的 $q=p\phi$ 中的 p. 因此 $\phi\psi=I$,所以 ψ 是 ϕ 的右逆元素, 如断言所述.

注 微积分学中函数记号 $y=\phi(x)$ 暗示记成 $y=\phi x$, 而前面我们写成 $y=x\phi$; 按照这种记号, ϕ 和 $z=\psi(y)$ 的合成自然写成 $z=(\psi\phi)x$,它是作为 $z=\psi(\phi(x))$的缩写记号,并代替 $z=x\phi\psi$. 因此 $\psi\phi$ 的意思是"先执行 ϕ,后执行 ψ", 而右逆元素和左逆元素的概念应相互对换. 虽然上述两种记号用任何一种都是可以的, 但是一定要避免它们之间的混淆. 然而, 双边逆元素的意思保持不变,正如下面推论所述.

推论 1 *变换 $\phi:S\to S$ 是双射当且仅当它既有右逆元素又有左逆元素. 如果 ϕ 是双射, 那么 ϕ 的任意右逆元素等于 ϕ 的任意*

① 在这样的点 q 组成的集合是无限的情况下, 选择公理(参见 § 12.2)断言: 对每个 q, 可以选择无限多个这样的 p.

左逆元素.

事实上,如果 ϕ 有右逆元素 θ 和左逆元素 ψ,那么

$$\theta = I\theta = (\psi\phi)\theta = \psi(\phi\theta) = \psi I = \psi.$$

把变换 $\phi: S \to S$ 的(双边)逆元素定义为满足

逆律 $$\phi\phi^{-1} = \phi^{-1}\phi = I$$

的任意变换 ϕ^{-1}. 这些等式也表明 ϕ^{-1} 是 ϕ 的(双边)逆元素, 因此进一步有

推论 2 变换 $\phi: S \to S$ 是双射当且仅当 ϕ 有(双边)逆元素 ϕ^{-1}. 如果 ϕ 是双射, 那么 ϕ 的任何两个逆元素是相等的, 并有

$$(\phi^{-1})^{-1} = \phi. \tag{4}$$

这个推论后面将要用到. 它可以直接证明, 因为 ϕ^{-1} 只不过是这样一个变换, 它把 S 的每个点 $q = p\phi$ 变回原来唯一的点 p. 在 S 是有限的特殊情况下, ϕ 是一一的当且仅当 ϕ 是映上的, 因此在这种情况中左逆元素和右逆元素的更细致的讨论是没有意义的.

对于集合 S 到另一个集合 T 的函数 $\phi: S \to T$ 来说, 定理 1 及其推论以及它们的证明也都成立. 我们只须注意, 左逆元素 ψ 或者右逆元素 θ 是第二个集合 T 到集合 S 中的变换, 并注意

$$\psi\phi = I_T: T \to T, \quad \phi\theta = I_S: S \to S.$$

这里 I_S 和 I_T 分别是 S 和 T 上的恒等变换.

我们现在准备定义变换群这一重要概念. "空间" S 上的变换群是指满足下列条件的把 S 映上 S 的一一变换 ϕ 组成的任意集合 G:

(i) S 的恒等变换在 G 中;

(ii) 如果 ϕ 在 G 中, 则它的逆元素也在 G 中;

(iii) 如果 ϕ 和 ψ 在 G 中, 则它们的积也在 G 中.

定理 2 任意空间 S 到自身的所有双射所组成的集合 G 是一个变换群.

证明 因为$II=I$, S上的恒等变换I是双射，因此I在集合G中，上面的条件(i)满足. 如果ϕ在G中，由前面的推论2得ϕ^{-1}也是双射，因此它同样在G中，条件(ii)满足. 最后，任意两个把S映上S的一一变换ϕ和ψ，它们的乘积有逆元素，因为根据假设

$$(\phi\psi)(\psi^{-1}\phi^{-1})=\phi(\psi\psi^{-1})\phi^{-1}=\phi I\phi^{-1}=\phi\phi^{-1}=I,$$

$$(\psi^{-1}\phi^{-1})(\phi\psi)=\psi^{-1}(\phi^{-1}\phi)\psi=\psi^{-1}I\psi=\psi^{-1}\psi=I.$$

因此$\phi\psi$也是双射，并且有逆元素

$$(\phi\psi)^{-1}=\psi^{-1}\phi^{-1}. \tag{5}$$

口头上说就是，乘积的逆元素等于逆元素颠倒次序相乘.

证毕

有限集S到它自身的双射通常称为S的*置换*. n个元素的所有置换组成的群称为*n次对称群*；显然它包含$n!$个置换，这因为第一个元素的象k_1可以有n种方式选取，然后，第二个元素的象可从去掉k_1剩下的元素中以$n-1$种方法选取，等等.

习 题

1. 在正方形对称群中计算VD, $(VD)R''$, DR'', $V(DR'')$.

2. 类似习题1，计算HR, $R'(HR)$, $R'H$, $(R'H)R$.

3. 设S由所有实数组成(或由直线上的所有点x组成)，所考虑的变换具有形式$x\phi=ax+b$. 在下列各种情况中，以所指定类型的a和b为系数的所有可能的变换ϕ组成的集合，哪些是变换群，并给出证明.

(a) a和b是有理数；

(b) $a=1$, b是奇数；

(c) $a=1$, b是正整数或零；

(d) $a=1$, b是偶数；

(e) a是整数, $b=0$；

(f) $a\neq0$, a和b是实数；

(g) $a\neq0$, a是整数, b是实数；

(h) $a\neq 0$, a 是实数, b 是整数;

(i) $a\neq 0$, a 是整数, b 是无理数;

(j) $a\neq 0$, a 是有理数, b 是实数.

在这些变换群中, 哪些群的乘法满足交换律?

4. 找出恰有三个"点"的"空间"S 上的所有变换, 共有多少个变换? 其中有多少是一一变换?

5. 证明: 所有正整数的集合上的变换 $n\mapsto n^2$ 没有左逆元素. 并列出两个明显的右逆元素.

6. 列出正文中定义的变换 $\psi_0:\mathbf{Z}\to\mathbf{Z}$ 的两个不同的左逆元素, 并列出 ϕ_0 的两个不同的右逆元素.

7. 证明: 如果 ϕ 和 ψ 二者都有右逆元素, 那么 $\phi\psi$ 也有右逆元素.

8. 对于正方形对称群, 计算 $[R^{-1}(VR)]^{-1}[(R^{-1}D)R]$.

9. 对正方形对称群, 解方程 $RXR'=D$.

10. 在正方形对称群中, 验证

$$(RH)^{-1}=H^{-1}R^{-1}\neq R^{-1}H^{-1}.$$

11. 求出矩形每个对称的逆元素, 并验证公式(5).

12. 证明: 如果 $\phi_1, \phi_2, \cdots, \phi_n$ 是一一的, 那么 $\phi_1\phi_2\cdots\phi_n$ 也是一一的, 且有逆元素

$$(\phi_1\phi_2\cdots\phi_n)^{-1}=\phi_n^{-1}\cdots\phi_2^{-1}\phi_1^{-1}.$$

13. 证明: 对任意 $\phi:S\to S$, 由定理 1 证明的第二部分所构造的变换 ψ 满足 $\phi\psi\phi=\phi$.

*14. 证明: 具有唯一右逆元素或唯一左逆元素的变换 $\phi:S\to S$, 必是 S 到 S 上的一一变换.

§6.3 其他例子

立方体的所有对称构成另一个有趣的群. 用几何语言来说, 这些对称是保持立方体上距离不变的一一变换. 它们被称为"等距变换", 共有 48 个. 为了说明这一点, 我们注意到, 任意一个初始顶点可以变换到八个顶点中任意一点. 任意顶点的变换固定之后, 这个顶点的三个相邻顶点可以有六种方式进行排列, 于是给出 $6\cdot 8=48$ 种可能性. 当一个顶点和它的三个相邻顶点的位置确定

时，立方体上任何一点的位置也就固定下来，所以整个对称就知道了. 因此立方体恰有 48 个对称. 它们中间很多都具有特殊的几何性质，例如，其中一个对称是把立方体的每个点反射成对径点.

包含着无穷多个变换的一个熟悉的群是所谓欧几里得群. 这个群由平面的所有“等距变换”组成，或者用初等几何的语言来说，在这些变换下，平面同自身是全等的. 这个群由平移、刚体旋转和反射的乘积组成. 我们将在第九章详细讨论它.

另一个群是由空间的所有“相似变换”组成，即由那些使一切距离扩大常数 $k(k>0$，称为比例因子) 倍的一一变换组成. 任意球面变为自身的所有刚体运动又构成一个群. 使平面上正六边形网络（图 2)保持不变的所有“等距变换”构成另一个有趣的群.

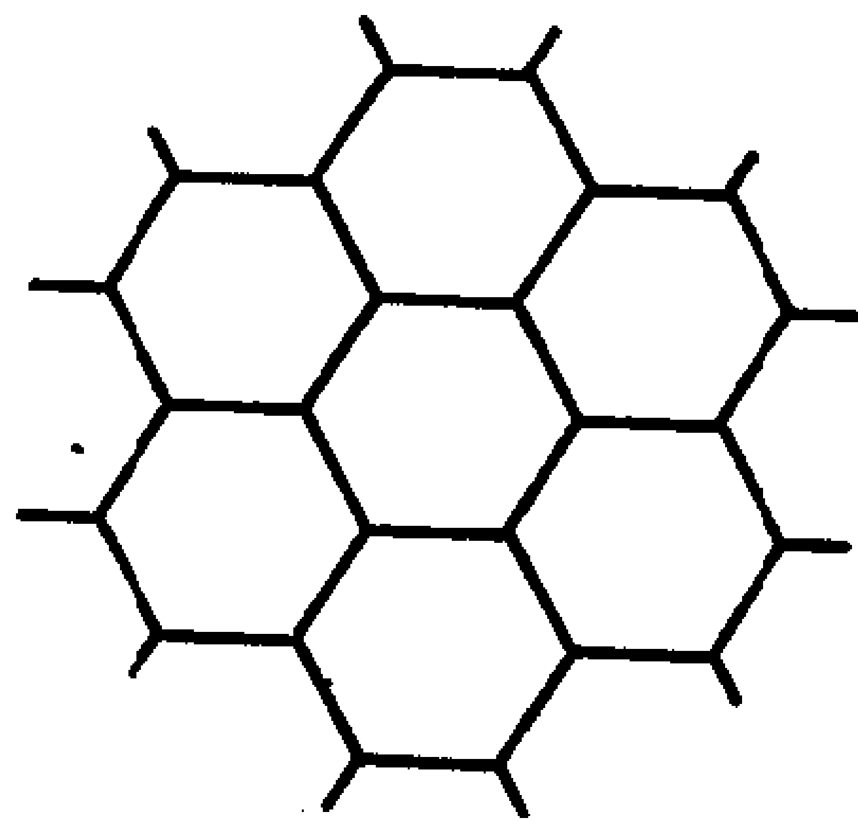


图 2

再有，一条橡皮绳沿一直线摆放着，绳的两端分别固定在 P，Q 两点，它可以沿着这条直线以很多种方式变形. 所有这些变形构成一个群(通常称为线段 PQ 的同胚群).

一般地说，任意集合的一一变换，如果保持集合中元素的某个或某些任意给定的性质，那么这些一一变换构成一个群. 克莱茵 (Felix Klein) (Erlanger 纲领, 1872)雄辩地描述了，不同的几何分支可以看作是研究相应空间的那些在适当的变换群下保持不变的性质. 例如，欧几里得几何是研究空间的那些在所有等距变换下保持不变的性质，拓扑学是研究空间的那些在所有同胚变换之下保持不变的性质. 类似地，射影几何和仿射几何分别研究空间在射影群和仿射群下保持不变的性质. 射影群和仿射群的定义将在第九章给出.

习　题

1. 描述带有六个等间隔辐条的车轮的全部对称.

2. 描述一个顶点固定的立方体的六个对称.

3. 设 S, T 是立方体关于两个平面的反射，这两个平面分别平行于立方体的两个不同的侧面. 描述 ST 的几何意义.

4. 描述一些把图 2 的正六边形网络变到自身的平面等距变换.

5. 对正方形网络做习题 4. 你能数出所有这样的变换吗(这是困难的)?

6. 对正三角网络做习题 4，并说明这些变换与习题 1 的变换群的关系.

7. 对下述几种情况做习题 4:

   (a) 无限圆柱体,

   (b) 有限圆柱体,

   (c) 圆柱螺旋线，即一条围绕柱面并与圆柱轴线成定角的螺旋线.

*8. 证明：所有变换 $x \mapsto x' = \dfrac{ax+b}{cx+d}$(其中系数 a, b, c, d 在任意域 F 中，并且 $ad-bc=1$) 组成一个群，这些变换作用在由域 F 的全体元素和符号元素 ∞ 组成的集合上.

§6.4　抽　象　群

变换群决不是其乘法满足 §6.2 中所说的结合律、同一律和逆律的唯一系统. 例如，任意域(如有理数域，实数域和复数域)的全体非零元素都满足这些定律. 因为任意两个非零元素的乘积是一个非零元素；结合律成立；域的单位元素 1 满足同一律，并且 $\dfrac{1}{x} = x^{-1}$ 满足逆律.

类似地，任意整环的全体元素(这次包括零)在加法运算之下满足上述三个定律. 例如，任意两个元素有唯一确定的和；加法满足结合律；对于加法运算，零满足同一律，$-x$ 满足逆律. 换句话说，任意整环的全体元素在加法之下构成一个群.

为方便起见，我们引进包含上述和其他一些例子的群的抽象

概念.

定义 具有二元运算的元素集合 G, (i) 运算满足结合律; (ii) 有一个满足同一律的单位元素; (iii) 对每个元素 a, 有元素 a^{-1}(称为 a 的逆)满足逆律, 则这个集合 G 称为群.

我们可以不提变换,用许多方式抽象地给出群的定义,这样定义的群常常称为抽象群.

在讨论抽象群的时候, 元素用小写拉丁字母 a, b, c, …来表示. 乘积记号"ab"通常用来表示 G 的两个元素 a 和 b 在群的运算之下而得的结果,但是其他记号,象"$a+b$"和"$a\circ b$"也同样适用.在乘积记号中,用"e"表示单位元素,定义群的三个定律变为

结合律 $a(bc)=(ab)c$, 对一切 a, b, c.

同一律 $ae=ea=a$, 对一切 a.

逆 律 $aa^{-1}=a^{-1}a=e$, 对每个 a 和某个 a^{-1}.

其运算满足交换律的群称为交换群或阿贝耳群. 利用这个概念我们可以把域的定义简化如下.

定义 集合 F 满足下列条件时称为域, F 在两个唯一确定的二元运算——加法和乘法之下是封闭的,并有

(i) 在加法之下, F 是具有单位元素零的交换群;

(ii) 在乘法之下, F 中非零元素构成交换群;

(iii) 分配律成立: $a(b+c)=ab+ac$.

为证明这个定义同 § 2.1 中给出的定义是等价的, 我们注意,这里给出的公设,除了含有因子零的乘法结合律外,包含前面对域所描述的一切公设. 这可以详细地验证.

第一、二章的第一节中的一些结果现在将表现为下面关于群的定理的推论.

定理 3 在任意群中, $xa=b$ 和 $ay=b$ 有唯一解, 分别为 $x=ba^{-1}$ 和 $y=a^{-1}b$. 因此由 $ca=da$ 可推出 $c=d$, 同样由 $ac=ad$ 可推

出 $c=d$(消去律).

证明 如果 a^{-1} 是在逆律中确定的元素，显然，$(ba^{-1})a=b(a^{-1}a)=be=b$. 类似地，$a(a^{-1}b)=b$. 反过来，由 $xa=b$ 可推出 $x=xe=xaa^{-1}=ba^{-1}$, 同样地，由 $ay=b$ 可推出 $y=a^{-1}b$.

注意，在这个证明中并没有假定 a^{-1} 是满足 $xa=e$ 的唯一的元素. 但 a^{-1} 确是唯一的，这是因为，若 $xa=e$, 则

$$x=xe=x(aa^{-1})=(xa)a^{-1}=ea^{-1}=a^{-1}.$$

类似地，a^{-1} 是使得 $ay=e$ 的唯一元素.

因为根据定理 3，在任意群 G 中方程 $ex=e$ 和 $ay=e$ 有唯一解分别为 $x=e$ 和 $y=a^{-1}$, 因此我们得到

推论 群有唯一的单位元素，并且对每个元素 a 有唯一的逆 a^{-1}.

定理 4 前面所述的群的定义中，同一律和逆律可以用较弱的形式来代替.

左同一律 对所有的元素 a, 存在某元素 e, 满足 $ea=a$.

左逆律 对给定的元素 a, 存在某元素 a^{-1}, 满足 $a^{-1}a=e$.

证明 如果这些弱的定律成立，则左消去律也成立，即由 $ca=cb$ 可推出 $a=b$. 因为我们只须用 c^{-1} 左乘等式 $ca=cb$ 的两边，再用结合律得到 $(c^{-1}c)a=(c^{-1}c)b$, 这就是 $ea=eb$, 故得 $a=b$.

给出的这个左单位元素也是右单位元素，这是因为

$$a^{-1}ae=ee=e=a^{-1}a,$$

再根据左消去律，因此对所有的 a, 有 $ae=a$. 最后，左逆元素也是右逆元素，因为由于左单位元素也是右单位元素，则有

$$a^{-1}(aa^{-1})=(a^{-1}a)a^{-1}=ea^{-1}=a^{-1}=a^{-1}e,$$

现在再用左消去律，得 $aa^{-1}=e$. 这就完成了我们的证明.

还有很多其他的群公设系统，常用的一个是按照除法的可能性来建立的，如下所述:

定理5 如果G是一个非空集合，在满足结合律的乘法之下是封闭的，对于这个集合所有的方程$xa=b$和$ay=b$在G中有解x和y，那么G是一个群.

证明留作习题(习题12).

除了对任意群G把有关乘法的代数定律系统化以外，当G的元素有限时，我们还可以用“乘法表”的形式给出G中任意两个元素乘积的特殊构成法则. 这个乘法表是一些元素的正方形阵列，表的最左一列和最上一行列出群的所有元素. 表中对应着最左列上的a和最上行的b的那个元素是乘积ab(按此次序).

为举例说明，我们在表1中绘制了正方形对称群的乘法表. 这个表的计算可以按照§6.1中证明的$HR'=D'$和$RH=D$的模式来进行. 其他方法将在§6.6中描述.

表1　正方形对称群

	I	R	R'	R''	H	V	D	D'
I	I	R	R'	R''	H	V	D	D'
R	R	R'	R''	I	D	D'	V	H
R'	R'	R''	I	R	V	H	D'	D
R''	R''	I	R	R'	D'	D	H	V
H	H	D'	V	D	I	R'	R''	R
V	V	D	H	D'	R'	I	R	R''
D	D	H	D'	V	R	R''	I	R'
D'	D'	V	D	H	R''	R	R'	I

关于群的大部分性质可以直接从表中看到. 例如，单位元素的存在表明，某一行和相应的列一定分别是顶头一行和最左边一列的复制品. 方程$ay=b$可解意味着a所在的那一行一定包含元素b；因为解是唯一的，所以b在这一行中只能出现一次. 一个群是

交换群当且仅当它的乘法表关于主对角线（即左上角到右下角的联线）是对称的. 遗憾的是，结合律不容易从这个表中直观地看出.

习　题

1. 设 a, b, c 是群的固定元素，证明方程 $xaxba = xbc$ 有唯一解.

2. 证明：在 $2n$ 个元素的群中，除单位元素外还存在一个元素同它的逆相等.

3. 全体正实数在加法下构成一个群吗？在乘法下构成群吗？全体偶数在加法下构成群吗？全体奇数呢？为什么？

4. 在模 11 整数域 $\mathbf{Z}_{11}$ 中，下列集合中哪些在乘法下构成群：

(a) (1, 3, 4, 5, 9),

(b) (1, 3, 5, 7, 8),

(c) (1, 8),

(d) (1, 10).

5. 证明：含有四个元素或少于四个元素的群一定是阿贝耳群.（提示：ba 是 e, a, b, ab 中的一个，显然的情形除外.）

6. 证明：如果在一个群中 $xx = x$，则 $x = e$.

7. 下列乘法表描述一个群吗？

	a	b	c	d
a	b	d	a	c
b	d	c	b	a
c	a	b	c	d
d	c	a	d	a

	a	b	c	d
a	a	b	c	d
b	b	a	d	c
c	c	d	a	a
d	d	c	b	b

8. 证明：§1.2 中法则 2, 4 和 6 在任意交换群中都成立.

9. 下列数集中哪一些是群？为什么？

(a) 所有有理数，在加法运算之下；在乘法运算之下.

(b) 所有无理数，在乘法运算之下.

(c) 所有绝对值为 1 的复数，在乘法运算之下.

(d) 所有绝对值为 1 的复数，在运算 $z \circ z' = |z| \cdot z'$ 之下.

(e) 所有整数，在减法运算之下.

(f) 任意整环的全体单位(§3.6),在乘法运算之下.

10. 证明: 下列公设系统描述一个阿贝耳群:

(i) 对一切 a, b, c 有 $(ab)c=a(cb)$;

(ii) 定理 4 的"左同一律"成立;

(iii) 定理 4 的"左逆律"成立.

*11. 证明: 如果对群 G 中所有元素有 $x^2=e$, 那么 G 是交换群.

*12. 证明定理 5. (提示: 如果 $ax=a$, 那么 x 是右单位元素, 并且任意右单位元素等于左单位元素.)

*13. 设 S 是一个非空集合, 在乘法运算之下是封闭的, 并且满足 $ab=ba$, $a(bc)=(ab)c$, 由 $ax=ay$ 可推出 $x=y$.

(a) 证明: 若 S 有限, 则 S 是群.

(b) 证明: 若 S 有限或无限, 则 S 可以嵌入一个群中.

§6.5 同　构

考虑实数整环上的变换 $x\mapsto\log x$. 我们知道, 当 x 在区间 $0<x<+\infty$ 上增加时, $\log x$ 就在区间 $-\infty<x<+\infty$ 上连续增加; 也就是说, 这个对应是正实数系和全体实数系之间的一一对应(逆变换是 $y\mapsto e^y$). 而且对所有的 x, y, 有 $\log(xy)=\log x+\log y$, 于是我们可以用相应的和的计算代替乘积的计算. 事实上, 这是对数主要的实际用途.

其次, 设 $\mathbf{Z}_3$ 是模 3 整数构成的域(§3.10), 并设 G 是等边三角形到自身的刚体旋转群. 如果 I, R 和 R' 分别表示转过 $0°$, $120°$ 和 $240°$ 的旋转, 那么把整数同旋转联系起来的对应 $0\leftrightarrow I, 1\leftrightarrow R, 2\leftrightarrow R'$ 是一个把 $\mathbf{Z}_3$ 中元素的和映射成 G 中相应旋转的乘积的双射. 例如, 考虑对应

$$1+2\equiv 0 \pmod 3 \quad\leftrightarrow\quad RR'=I,$$

$$2+2\equiv 1 \pmod 3 \quad\leftrightarrow\quad R'R'=R.$$

这些都是§1.12 中所谈到的"同构"一般概念的例子. 这个概念对群来说比对整环更简单也更重要.

定义 两个群 G 和 G' 之间的同构指的是它们元素之间保持群的乘法的双射 $a \leftrightarrow a'$，即它满足，若 $a \leftrightarrow a'$ 和 $b \leftrightarrow b'$，则 $ab \leftrightarrow a'b'$.

例如，在第一个例子中我们描述了正实数乘法群与实数加法群之间的同构. 在第二个例子中，我们指出一个模 3 整数加法群与正三角形旋转对称群之间的同构.

类似地，映射 $0 \mapsto 1, 1 \mapsto 2, 2 \mapsto 4, 3 \mapsto 3$ 是模 4 整数加法群与模 5 非零整数乘法群之间的同构. 通过比较模 4 整数加法群的加法表和模 5 非零整数乘法群的乘法表来验证这个结果是方便的. 见表 2 和表 3.

表 2

+	0	1	2	3
0	0	1	2	3
1	1	2	3	0
2	2	3	0	1
3	3	0	1	2

表 3

×	1	2	4	3
1	1	2	4	3
2	2	4	3	1
4	4	3	1	2
3	3	1	2	4

依次我们有，模 4 整数加法群同构于正方形旋转对称群. 通过比较表 2 和表 1(§6.4)的旋转部分可以验证，双射 $0 \leftrightarrow I, 1 \leftrightarrow R, 2 \leftrightarrow R', 3 \leftrightarrow R''$ 是一个同构.

同构的概念很重要，因为它使我们认识到，完全不同内容的群从抽象群论的观点看可以看成同一个群. 同构的群抽象地认为是同一个群(它们的差别仅在于它们元素符号的不同)，这个事实可以在很多情况下看到.

例如，根据定义，两个有限群 G 和 G' 同构当且仅当通过适当的替换，从 G 的群表可以得出 G' 的群表. 从 § 6.4 的倒数第二句可以得出，G' 是阿贝耳群当且仅当 G 是阿贝耳群，也就是说，一个有限阿贝耳群的任何同构象是阿贝耳群. 还有，在其他方面，同构

的性质很象相等.

定理 6 关系"群 G 同构于群 G'"满足群之间的自反的、对称的和传递的关系.

证明 自反性是显然的(每个群通过恒等变换同它自身同构). 对于对称性, 设 $a \leftrightarrow aT$ 是 G 和 G' 之间的任意同构对应, 因为 T 是双射, 所以 T 有逆元素 T^{-1}, T^{-1} 是 G' 到 G 上的同构. 最后, 如果 T 把 G 同构地映射到 G' 上, 而 T' 把 G' 同构地映射到 G'' 上, 那么 TT' 就是 G 和 G'' 之间的同构. 证毕

值得注意的是, 定理 6 及其证明对于整环之间的同构同样成立, 而且对于任何类型的代数系统之间的同构也都成立.

定理 7 在两个群同构之下, 它们的单位元素相互对应, 相应元素的逆元素相互对应.

证明 方程 $ax=a$ 的唯一解 e 对应到 $a'x=a'$ 的唯一解 e', 因此单位元素相互对应. 所以, G 中方程 $ax=e$ 的唯一解 a^{-1} 对应到 G' 中方程 $a'x=e'$ 的唯一解 a'^{-1}. 这就完成了证明.

我们最后证明著名的凯莱(Cayley)定理, 这个定理可被解释为是证明变换乘法有关公设的完备性.

定理 8 任意抽象群 G 与一个变换群同构.

证明 把由 G 的所有元素组成的"空间"上的每个变换 $\phi_a: x \to xa = x\phi_a$ 同 G 的元素 a 联系起来. 因为由 $e\phi_a = e\phi_b$ 可推出 $a = ea = eb = b$, 所以 G 的不同元素对应着不同的变换. 因为对所有的 x, 有

$$x(\phi_a\phi_b) = (x\phi_a)\phi_b = (xa)\phi_b = (xa)b = x(ab) = x\phi_{ab}, \qquad (6)$$

所以乘积 $\phi_a\phi_b = \phi_{ab}$, 因而所有 ϕ_a 的集合 G' 包含任意两个变换, 就一定包含它们的乘积. 再有, 因为对所有的 x 有 $x\phi_e = xe = x$, 所以 G' 包含单位元素. 我们可以类似地证明, 对所有的 a, $(\phi_a)^{-1}$ 存在, 并在 G' 中, 实际上它就是 $\phi_{a^{-1}}$. 因此 G' 是一个变换群, 根

据(6)，它与G同构.

习　　题

1. 下列群中，任意两个群都同构吗？

　(a) 等边三角形的对称群，

　(b) 正方形对称群，

　(c) 正六边形的旋转群，

　(d) 模 6 整数加法群.

2. 与习题 1 同样的问题.

　(a) 正方形的旋转群，

　(b) 矩形的对称群，

　(c) 菱形(等边平行四边形)的对称群，

　(d) 模 13 整数 1, 5, 8, 12 的乘法群，

　(e) 模 12 整数 1, 5, 7, 11 的乘法群.

3. (a) 证明："高斯整数"$m+n\sqrt{-1}$ (m, $n\in\mathbf{Z}$) 的加法群同形为 2^n3^m ($m, n\in\mathbf{Z}$)的有理因子的乘法群同构.

　(b) 给出两个与矩形网络的变换群同构的群.

*4. 非零实数构成的乘法群与所有实数构成的加法群同构吗？

5. 确定 $\mathbf{Z}_4$ 的加法群与正方形的旋转群之间所有同构.

6. (a) 列出正方形对称群与正方形四个顶点 1, 2, 3, 4 上的变换群之间的同构.

　(b) 象定理 7 那样明显地指出，两个群中的逆元素在这个同构之下是如何对应的.

7. 对正六边形的旋转群，做习题 6.

8. 列出与下列每个群同构的变换群，说明定理 8.

　(a) 所有实数构成的加法群，

　(b) 所有非零实数构成的乘法群，

　(c) 模 8 整数加法群.

§6.6　循　环　群

在任意群中，元素a的整数幂a^m可以分别对正指数、零指数

和负指数来定义．当 $m>0$ 时，我们定义

$$a^m=a\cdot a\cdots a\ (m\text{个因子}),a^0=e,\qquad a^{-m}=(a^{-1})^m. \tag{7}$$

两个普通的指数定律成立：

$$a^ra^s=a^{r+s},\quad (a^r)^s=a^{rs}. \tag{8}$$

另一方面，一般来说，$(ab)^r\neq a^rb^r$（参见习题 2）．

如果两个指数 r 和 s 都是正的，那么定律(8)可由定义(7)直接推出①（参见 §1.5）．对于(8)式的第一个定律的其他情形，当 r 和 s 中有一个可能为零时，(8)式立即得出；当 r 和 s 两者都可能为负的时，(8)式可从定义(7)的最后一个公式直接推出．剩下的情形就是一个指数为负一个指数为正，比如 $r=-m, s=n$，其中 $m>0, n>0$．这时

$$a^{-m}a^n=(a^{-1})^ma^n=\underbrace{(a^{-1}\cdots a^{-1})}_{m\text{个}}\underbrace{(a\cdots a)}_{n\text{个}}.$$

根据结合律我们可以相继消去一些 a 和 a 的逆 a^{-1}．当 $n\geqslant m$ 时，留下 a^{n-m}，而当 $n<m$时，留下某些逆，即$(a^{-1})^{m-n}$ 或 $a^{-(m-n)}$．这两种情形我们都得到所要求的 $a^{-m}a^n=a^{n+(-m)}$．

(8) 式的第二个定律可以更简单地证明．如果 s 为正，则由(8)式的第一个定律有

$$\underbrace{a^ra^r\cdots a^r}_{s\text{个因子}}=a^{r+r+\cdots+r}=a^{rs}.$$

如果 s 为负，注意不管 r 是正的，零和负的，都有$(a^r)^{-1}=a^{-r}$，我们可以做类似的展开．如果 s 为零，则立即可得结论．

定义 群中元素 a 的阶是指使得 $a^m=e$ 成立的最小正整数②

---

① r 个因子"a"后跟着 s 个因子"a"，共有 $r+s$ 个因子．再有，每组有 r 个因子"a"，s 组共有 rs 个因子．

② §1.4 的良序原理保证这个 m 一定存在．

m. 如果找不到 a 的正次幂等于 e, 则定义 a 的阶为无穷. 如果群 G 包含某一个元素 x, G 的元素都由 x 的幂组成, 那么称 G 为循环群; 这个元素 x 称为群 G 的生成元.

例如, 正方形的所有到自身的旋转构成的群是由 R 的四个幂 R, R^2, R^3 和 $R^4=I$ 组成, 这里 R 表示顺时针旋转 90°. 这个群完全等同地可以由 R^3 生成 (R^3 表示逆时针旋转 90°), 这因为 $R^2=(R^3)^2$, $R=(R^3)^3, I=(R^3)^4$, 同 R^3 一起组成这个群.

定理 9 如果元素 a 生成循环群 G, 那么 a 的阶可以确定群 G (在同构意义下). 事实上, 如果 a 的阶是无穷, 那么 G 同构于整数加法群; 如果 a 的阶是某有限整数 n, 那么 G 同构于模 n 整数加法群.

证明 首先, $a^r=a^s$ 当且仅当

$$e=a^r(a^s)^{-1}=a^ra^{-s}=a^{r-s}, \tag{9}$$

这里用了公式(8). 再看, 若 $r\neq s$, 则或 $r>s$, 或 $s>r$, 因此, 如果 a 的阶是无穷, 那么不存在整数 $r>s$ 使得 $a^{r-s}=e$, 所以不存在 a 的两个不同的幂是相等的. 此外, 由(8)有 $a^sa^t=a^{s+t}$, 因此对应 $a^s\mapsto s$ 使群 G 与整数加法群同构, 这就证明了定理的第一个结论.

如果 a 的阶是有限的, 那么使得 $a^t=e$ 的整数 t 的集合包含零, 由(8)可知这个集合还包含它的任意两个元素的和与差. 因此, 根据 § 1.7 定理 6, $a^t=e$ 当且仅当 t 是 a 的阶 n 的倍数, 所以根据公式(9), $a^r=a^s$ 当且仅当 $n\mid(r-s)$; 也就是说, $a^r=a^s$ 当且仅当 $r\equiv s\pmod n$. 最后, 再由(8), 有 $a^ra^s=a^{r+s}$, 所以对应 $a^r\mapsto r$ 是 G 到模 n 整数加法群的同构. 证毕

定理 9 的一个推论是, 任意循环群 G 的元素个数(称为群 G 的阶)等于 G 的任意一个生成元的阶, 任意两个同阶循环群同构.

正方形对称群不是循环群, 不过它是由两个元素 R 和 H 生成的; 事实上, 表 1(§6.4)指出

$$R^0=I,\ \ R=R,\ \ R^2=R',\ \ R^3=R'';$$
$$H=H,\ \ HR=D',\ \ HR^2=V,\ \ HR^3=D.$$
于是这个群的全体元素都可唯一地表示成 H^iR^j，其中 $i=0,1$, $j=0,1,2,3$. 此外，R 和 H 还满足
$$R^4=I, H^2=I, RH=HR^3.$$
这些等式称为“定义关系”，因为这些关系可以使任意两个元素的乘积 $H^iR^j(i=0,1)$ 化成同样的形式. 例如
$$D'V=HRHR^2=HHR^3R^2=IR=R,$$
类似的计算将给出正方形对称群的整个乘法表(表 1).

习　题

1. 利用定义 $a^1=a, a^{m+1}=a^m a$, 对正指数用归纳法来证明公式(8).

2. 证明：如果对 G 中一切 a, b, 及一切正整数 n, 有 $(ab)^n=a^n b^n$, 那么 G 是交换群，反之亦真.

3. 6 阶循环群有几个不同的生成元?

4. 证明：如果 6 元素的交换群包含一个 3 阶元素，那么这个群是循环群.

5. (a) 模 7 整数 1, 2, …, 6 组成的乘法群是循环群吗?

(b) 模 8 整数 1, 3, 5, 7 组成的乘法群是循环群吗?

(c) 模 9 整数 1, 2, 4, 5, 7, 8 组成的乘法群是循环群吗?

6. 设循环群 G 是由 m 阶元素 a 生成，证明：a^k 生成 G 当且仅当 k 与 m 互素.

7. 在习题 6 的假定之下，求 G 的任意元素 a^k 的阶.

8. 求正方形对称群中每个元素的阶.

9. 给出满足定义关系 $x^2=y^2=e$, $xy=yx$ 的两个元素 x 和 y 生成群 G 所有元素和乘法表.

10. 二面体群 D_n 是正 n 边形的所有对称构成的群(当 $n=4$ 时，D_n 就是正方形对称群). 证明：D_n 包含 $2n$ 个元素，并由两个元素 R 和 H 生成，这里 R 和 H 满足 $R^n=I, H^2=I, RH=HR^{n-1}$.

*11. 分别找出下面三个无限图案的对称群的生成元和定义关系. 三个群

中任意两个同构吗?

想象图形沿两个方向无限延伸下去.



*12. 对§6.3中的习题1, 2, 4和5进行与上题类似的讨论.

§6.7 子　群

很多群都包含在较大的群之中. 例如, 正方形的旋转群是正方形对称群的一部分. 再有, 根据对称性诱导出的正方形顶点的八个置换构成的群, 是这些顶点的所有 $4!=24$ 个置换组成的置换群的一部分. 偶数加法群是整数加法群的一部分.

这些例子提出子群的概念. 群 G 的一个子集 S, 如果关于 G 的二元运算(乘法) S 本身也是一个群, 那么称 S 为 G 的*子群*.

在任意群 G 中, 仅由单位元素 e 组成的集合是一个子群. 整个群 G 也是它自己的一个子群. G 中不是平凡("伪")子群 e 和 G 的子群称为*真子群*.

定理 10 *群 G 的非空子集 S 是子群当且仅当 (i) 由 a 和 b 在 S 中推出 ab 在 S 中; (ii) 由 a 在 S 中推出 a^{-1} 在 S 中.*

证明 在这些假设之下, 显然 S 是一个子群: 结合律是显然的; 因为至少有一个元素 a 在 S 中, 所以 G 的单位元素 $e=aa^{-1}$ 在 S 中; 群的其他公设已被假定. 反过来, 我们必须证明在任一子群中 (i) 和 (ii) 成立. G 的任意子群的单位元素 $x=e'$ 满足 $xx=x$, 因此它是 G 的单位元素(§6.4 习题 6). 由此可以推出, 因为对任何元素 a, G 有且仅有一个逆元素, 所以在子群中任何元素 a 的逆元素与它作为 G 中元素的逆元素是同一个元素, 故 (ii) 成立. 条件 (i) 是显然的.

对于有限阶 (m) 元素 a, 显然有 $a^{m-1}a=a^m=e$, 因此 $a^{-1}=a^{m-1}$. 于是我们有下面简化的条件.

定理 11 有限群 G 的非空子集 S 是群 G 的子群当且仅当 S 中任意两个元素的乘积仍在 S 中.

在已知的非阿贝耳群 G 的所有子群中间，最重要的一个子群是 G 的中心. 它定义为，对一切 $x \in G$ 满足关系 $ax = xa$ 的所有元素 $a \in G$ 的集合. 我们留给读者验证. 实际上，群的中心总是 G 的子群.

确定一个特定群 G 的全部子群，一般来说是很困难的. 在 G 是循环群的情况下，我们现在来确定它的全部子群.

定理 12 循环群 G 的任何子群是循环群.

证明 设 G 由元素 a 的幂组成. 如果 a^s 和 a^t 在 S 中，则由定理 10, $a^{s+t} = a^s a^t$ 和 $a^{s-t} = a^s (a^t)^{-1}$ 都在 S 中. 因此，使 a^s 在 S 中的整数 s 组成的集合在加法和减法之下是封闭的，所以①这个集合由某一个最小正指数 r 的所有倍数组成（§ 1.7 定理 6）. 因而 S 由所有幂 $a^{kr} = (a^r)^k$ 组成，因此 S 是以 a^r 为生成元的循环群.

在 G 为无限的情况下，每个 $r > 0$ 确定不同的子群. 如果 G 有 n 个元素，那么，因为 $a^n = e$ 一定在 S 中，所以只有那些 n 的因子 $r > 0$ 才能用这种方法确定出 G 的子群，而这些子群全不相同.

为得到进一步研究子群的材料，我们现在列出正方形对称群的全部子群. 通过验证 § 6.1 给出的这个群运算的定义，我们找到了全部真子群，每个子群保持下列八种构形中的一种不变性：

一对角线	一轴	一面
$[I, D, D', R']$	$[I, H, V, R']$	$[I, R, R', R'']$
一轴和一对角线	顶点 1（或 3）	顶点 2（或 4）
$[I, R']$	$[I, D]$	$[I, D']$
一垂直边	一水平边	
$[I, H]$	$[I, V]$	

① 当集合 S 仅由零组成时，取 $r = 0$，这个结论还成立.

这里保持面不变的变换，我们理解为正方形没有翻转的那些变换.所有这些子群可以在一个表上按它们相互之间的关系表示出来，其中每个群用向下的线或一串线同它的所有子群连接起来，如图3所示.

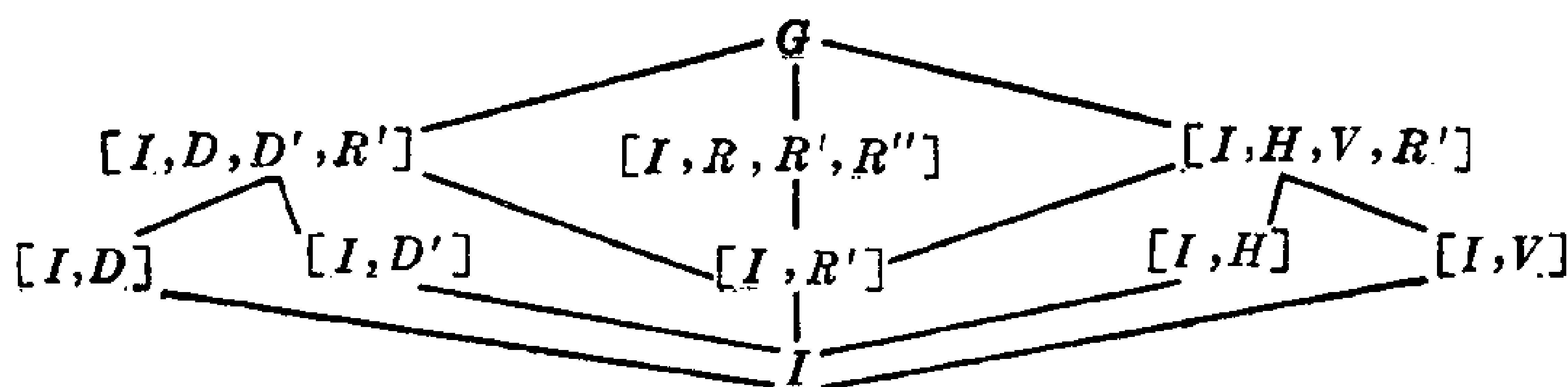


图 3

不用几何方法我们也可以找出所有这些子群. 事实上，把群的元素看作纯抽象的元素，可以最有效地确定一个特定有限群 G 的全部子群，如下所述.

首先注意，如果 G 的子群 S 包含元素 a，则 S 也包含由 a 的所有幂组成的循环子群 $\{a\}$（证明它是子群！）. 在上述例子中，这个方法给出列出的除前两个子群以外的所有子群. 其次注意，任何子群不仅包含两个循环子群 $\{a\}$ 和 $\{b\}$，而且必包含 a 和 b 的幂的所有乘积（例如 $a^2b^{-3}a$）所组成的集合 $\{a, b\}$.（用定理 11 证明这个集合构成一个子群！）在上述例子中，这种方法给出了剩下的子群.（在 §6.8 我们将看到，为什么这些子群都是含有 2 个或 4 个元素.）一般来说，我们还可以进一步对由三个或更多的元素生成的子群 $\{a, b, c\}$ 进行检验，但是这时群中元素的个数应至少是四个不同素数之积，否则决不会发生这种情况.

两个子群（实际上也可以是任意两个集合！）S 和 T 的交 $S\cap T$ 是由既属于 S 又属于 T 的所有元素组成的集合.

定理 13 群 G 中两个子群 S 和 T 的交 $S\cap T$ 是 G 的子群.

证明 根据定理 10，a 在 $S\cap T$ 中意味着 a 在 S 中，因此 a^{-1}

在 S 中；同样可推出 a^{-1} 在 T 中，所以 a^{-1} 在 $S\cap T$ 中. 类似地，a 和 b 都在 $S\cap T$ 中意味着 ab 既在 S 中又在 T 中，所以 ab 在 $S\cap T$ 中. 因此根据定理 10，$S\cap T$ 是一个子群. 还有，$S\cap T$ 包含 e，所以 $S\cap T$ 是非空的. 证毕

显然，$S\cap T$ 是包含在 S 和 T 中的最大子群. 对偶地，存在包含 S 和 T 的最小子群. 它由 S 和 T 中元素的正幂和负幂的所有乘积组成，称它为 S 和 T 的并，记作 $S\cup T$. 在第十一章中我们将再讨论这些概念.

习　题

1. 在正六边形对称群中，保持对角线不变的子群是什么？

2. 证明：如果 T 是 S 的子群，S 又是 G 的子群，那么 T 是 G 的子群.

3. 在四个数字 1, 2, 3, 4 的置换群中（置换记作 ϕ），找出下列子群：

   (a) 所有把集合 $\{1, 2\}$ 变为 $\{1, 2\}$ 的置换 ϕ；

   (b) 所有适合"对集合 $\{1, 2, 3, 4\}$ 中任意两个数字 a, b, 由 $a\equiv b \pmod 2$ 可推出 $a\phi\equiv b\phi \pmod 2$"的置换 ϕ.

4. 证明：当 G 是无限的，但 G 的所有元素有有限阶，定理 11 仍然成立. 说明 $\mathbf{Z}_p[x]$ 的加法群就是这样一个群.

5. 列出下列各群的所有子群：

   (a) 模 12 整数加法群；

   (b) 正五边形对称群；

   (c) 正六边形对称群；

   *(d) 四个字母的置换群.

*6. 设 $a\leftrightarrow a'$ 是两个置换群 G 和 G' 之间的同构，又设 S 是 G 中保留一个字母固定的那些置换组成的集合. G' 中与所有 $a\in S$ 对应的那些元素组成的集合 S'，一定是 G' 的子群吗？集合 S' 一定保留一个字母固定吗？说明一下.

7. 证明：任意群 G 的中心是 G 的子群.

8. 找出下列各群的中心：

   (a) 正方形对称群；

(b) 等边三角形对称群.

*9. 找出正 n 边形对称群的中心.

*10. 证明: 任意交换群 G 中的全体有限阶元素构成 G 的一个子群.

§6.8 拉格朗日定理

我们现在来讨论抽象群理论中一个具有重要意义的概念: 群 G 的任意子群 S 分解 G 成陪集.

定义 群或子群的阶指的是它的元素个数. 设 S 是群 G 的一个子群, a 是 G 中一个固定元素, 则 S 的所有元素 s 用 a 右(左)乘的右(左)倍数 $sa(as)$ 所组成的集合 $Sa(aS)$ 称为 G 的子群 S 在 G 中的一个右(左)陪集. S 的不同右陪集的个数称为子群 S 在 G 中的"指数".

因为 $Se=S$, 所以 S 是它本身的一个右陪集. 此外我们有

引理 1 如果 S 是有限的, 则 S 的每个右陪集 Sa 中元素的个数同 S 的元素一样多.

这是因为, 变换 $s\longmapsto sa$ 是双射: 右陪集 Sa 的每个元素 $t=sa$ 是 S 的元素 $s=ta^{-1}$ 的象, 这个元素是唯一的. (参见定理 8.)

引理 2 S 的两个右陪集 Sa 和 Sb, 或者相等, 或者没有公共元素.

这是因为, 假定 Sa 和 Sb 有一个公共元素 $c=s'a=s''b$ (s', s'' 在 S 中). 那么 Sb 包含 Sa 的每个元素 $sa=ss'^{-1}s'a=ss'^{-1}s''b=(ss'^{-1}s'')b$. 类似地, Sa 包含 Sb 的每个元素. 所以 $Sa=Sb$.

举例说明这些引理是容易的. 例如, 如果 G 是正方形对称群, 则子群 $S=[I,H]$ 有四个右陪集:

$[I,H]I=[I,H]$,

$[I,H]R=[R,HR]=[R,D']$,

$[I,H]R'=[R',HR']=[R',V]$,

$$[I,H]R''=[R'',HR'']=[R'',D].$$

每个陪集有两个元素，并且对称群中的每个元素都落入这四个右陪集中的一个.

再有，如果 G 是整数加法群，则由 5 的倍数 $\pm 5n$ 组成的子群，它的所有右陪集就是模 5 的不同剩余类. 最后，设 G 是数字 1,2,…,6 的所有置换组成的对称群，而 S 是保持数字 1 固定的置换组成的子群. 那么由 $1\phi=k$ 可推出，对所有的 $\psi\in S$，有 $1(\psi\phi)=(1\psi)\phi=1\phi=k$. 因此陪集 $S\phi$ 只包含 5! 个把 1 变为 k 的置换(根据引理 1，这是 $S\phi$ 的全部元素). 所以 S 的右陪集是 G 中分别使 $1\mapsto 1, 1\mapsto 2, \cdots, 1\mapsto 6$ 的子集合.

从上述这些引理我们得到一个经典的结果，这个结果对有限群的理论来说是基本的和重要的. 因为任意右陪集 Sa 总包含 $a=ea$，所以任意群 G 的每个元素都包含在某一个右陪集中. 因此 G 可用 S 分解成一些不重迭的子集合，每个子集合的元素恰恰同 S 的元素一样多. 如果 G 是有限的①，这个结论就是

定理 14 (拉格朗日)*有限群 G 的阶是它的每个子群的阶的倍数.*

G 的每个元素 a 生成一个循环子群，它的阶就是 a 的阶(定理 9 的推论). 因此我们有

推论 1 *有限群 G 的每个元素的阶都是 G 的阶的因子.*

推论 2 *具有素数阶 p 的群是循环群.*

这是因为，在有限群中，由任意元素 $a\neq e$ 生成的循环子群 A 的阶 $n>1$，可整除 p. 而这就意味着 $n=p$. 因此 $G=A$ 是循环群.

更一般地，拉格朗日定理可以用来确定(精确到同构)所有任意低阶的抽象群. 例如，四群是定义为由四个可交换元素：e

---

① 推广到无限的情况，可从第十二章的讨论中立即得到，但这并不重要.

(单位元素)和 $a, b, c=ab$ 组成的群，后面三个元素的阶都是 2. §6.9 中我们将证明这个群与矩形对称群同构. 我们现在证明

推论 3 四阶抽象群只有四阶循环群和四群两种.

换句话说，每个四阶群或者同构于四阶循环群，或者同构于四群.

证明 当四阶群包含一个四阶元素时，这个群是循环群. 否则，由推论 1 知，G 的元素除 e 外，它们的阶一定都是 2. 记它们为 a, b, c. 根据消去律，ab 不可能是 $ae=a, eb=b$ 或 $aa=e$，因此 $ab=c$. 类似地，$ba=c, ac=ca=b$，$bc=cb=a$. 而这些等式连同 $a^2=b^2=c^2=e$，和对一切 x，有 $ex=xe=x$ 一起给出四群的乘法表.

拉格朗日定理也可以应用到数论中.

推论 4(费马) 如果 a 是整数，p 是素数，那么 $a^p\equiv a(\mathrm{mod}\,p)$.

证明 模 p 整数 (零除外) 乘法群有 $p-1$ 个元素. 那么根据推论 1，这个群的任意元素 a 的阶是 $p-1$ 的因子，所以对任何元素 $a\not\equiv 0(\mathrm{mod}\,p)$ 有 $a^{p-1}\equiv 1(\mathrm{mod}\,p)$. 如果我们用 a 乘同余式两边，我们就得到所要求的同余式. 对于 $a\equiv 0(\mathrm{mod}\ p)$ 的情况，结论显然正确.

习　　题

1. 对 $p=7$，和 $a=2, 3, 6$ 验证费马定理.

2. (a) 列出 26 阶二面体群 (§6.6 习题 10) 的全部子群. 共有多少子群？

   (b) 推广你的结果.

3. 证明：有限群的任意子群的右陪集的个数等于它的左陪集的个数. (提示：利用对应 $x\mapsto x^{-1}$.)

4. 确定正方形对称群的子群 $[I, D]$ 的陪集.

5. 设 S 是群 G 的任意子群，又设 SaS 表示由所有乘积 sas' (s, s' 在 S

中)组成的集合. 证明: 对任意 a, $b\in G$, 或者 $SaS\cap SbS$ 是空集, 或者 $SaS=SbS$.

6. 对任意子群 S, 设 $x\equiv y(\bmod S)$ 是指 $xy^{-1}\in S$.

(a) 证明: 这个关系满足自反律、对称律和传递律. 并证明: $x\equiv y(\bmod S)$ 当且仅当 x 和 y 在 S 的同一个右陪集中.

(b) 证明: 由 $x\equiv y(\bmod S)$ 可推出, 对一切 a 有 $xa\equiv ya(\bmod S)$.

7. 设 G 是正六边形对称群, S 是保持一个顶点固定的子群. 求出 S 的右陪集和左陪集.

8. 证明: p^m 阶群(这里 p 为素数)一定包含一个 p 阶子群.

9. (a) 设 G 是 $\mathbf{R}$ 上所有变换 $x\mapsto ax+b$(其中 $a\neq 0$ 和 b 为实数)构成的群, 而 S 是 $a=1$ 的所有这样的变换构成的子群. 描述 S 在 G 中的右陪集和左陪集.

(b) 又设 T 是 $b=0$ 的所有这样的变换构成的子群, 描述 T 在 G 中的右陪集和左陪集.

*10. (a) 证明: 在任意交换环 R 中, 所有单位(具有乘法逆元素的那些元素)构成一个群 G.

(b) 证明: 如果 $R=\mathbf{Z}_n$, 那么 G 是由所有与 n 互素的正整数 $k<n$ 组成.

(c) 在 $R=\mathbf{Z}_n$ 的情况下, G 的阶记作 $\phi(n)$, 并称为欧拉函数. 证明: 当 $n=p$ 为素数时, $\phi(p)=p-1$. 计算 $\phi(12)$, $\phi(16)$, $\phi(30)$.

(d) 用拉格朗日定理证明: 如果 $(k,n)=1$, 那么 $k^{\phi(n)}\equiv 1(\bmod n)$.

*11. 证明: 如果 S 和 T 分别是群 G 的 s 阶和 t 阶子群, 并且 $S\cap T$ 和 $S\cup T$ 的阶分别为 u 和 v, 那么 $st\leqslant uv$.

*12. 证明: 6 阶抽象群只有 6 阶循环群和三字母的对称群.

*13. 设 2^h+1 是素数 p.

(a) 证明: 模 p 整数乘法群中, 2 的阶是 $2h$.

(b) 利用费马定理推证: $2h$ 可整除 $p-1=2^h$.

(c) 导出结论 h 是 2 的幂.

§6.9 置换群

置换是有限集合到自身的一一变换. 例如, 由 1, 2, 3, 4, 5 五

个数字可以组成一个集合．一个置换可以是变换 ϕ：

$$1\phi=2,\ 2\phi=3,\ 3\phi=4,\ 4\phi=5,\ 5\phi=1. \tag{10}$$

另一个置换可以是变换 ϕ'：

$$1\phi'=2,\ 2\phi'=3,\ 3\phi'=1,\ 4\phi'=5,\ 5\phi'=4. \tag{11}$$

读者会发现，计算出 $\phi\phi'$ 和 $\phi'\phi$，并注意 $\phi\phi'\neq\phi'\phi$ 是有益的．

一个置换，象上面定义的置换 ϕ 那样，如果它给出置换符号的一个循环排列（图 4），那么这个置换称为*循环置换*或称为*循环*．为表示循环置换，有一个含蓄的记号——仅仅把字母写到括号里边，首先写出所包含的任何一个字母，然后写出它变换后的字母，…，最后写出能变换成原来第一个字母的那个字母．例如，(10)式表示的置换 ϕ 可以写成下列等价形式中的任何一个：

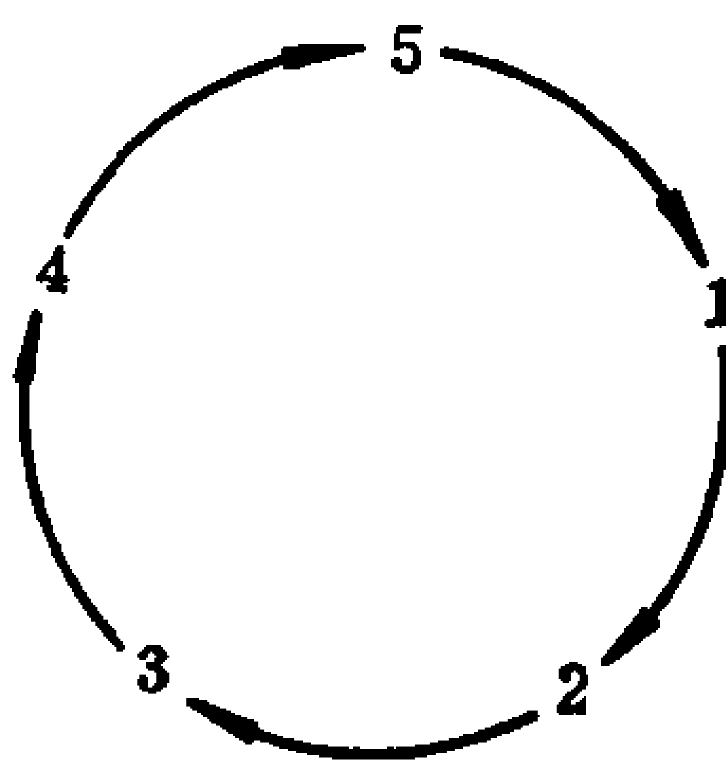


图 4

$$(12345),\ (23451),\ (34512),\ (45123),\ (51234).$$

定理 15 *n 个符号的循环置换的阶是 n．*

证明 循环置换 $\gamma=(a_1a_2\cdots a_n)$ 把 a_i 变成 a_{i+1}．因此 γ^2 的效果相当于 γ 作用两次，把每个 a_i 变成 a_{i+2}．一般地，γ^k 把 a_i 变成 a_{i+k}，这里所有下标都按模 n 化简了．γ^k为单位元素 I 当且仅当 a_{i+k} 等于 a_i，即当且仅当 $k\equiv0(\bmod n)$．因为使得 $\gamma^k=I$ 的最小整数 k 是 n 本身，所以 γ 的阶是 n（见 § 6.6 中的定义）．这时我们说循环 γ 的长度是 n．

循环置换的记号可以推广到任意置换的情形．例如，(11)式中表示的置换 ϕ'，把数字 1, 2 和 3 循环排列，并且把 4 和 5 循环排列．于是 ϕ' 是这两个循环的积

$$(123)(45)=(45)(123).$$

这个乘积可以按两种次序写，是因为由 (1, 2, 3) 置换过的符号在

(4,5)作用下保持不变，这表示按两种次序相继使用这两个置换，其结果一样.

定理 16 任意置换 ϕ 可写成几个循环的乘积，这些循环分别作用在不相交①的符号集上（更简洁些说，任意置换 ϕ 可写成几个不相交的循环之积）.

证明 选择任意一个符号记作 a_1，再用 a_2 表示 $a_1\phi$，用 a_3 表示 $a_2\phi$，…，用 a_n 表示 $a_{n-1}\phi$，直到 $a_n\phi=a_i$ 是前面某一个已经命名了的元素. 因为任意 $a_i(i>1)$ 前面一个元素是 a_{i-1}，所以 $a_n\phi$ 一定是 a_1. 于是 ϕ 作用到字母 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 上的结果是循环 $(a_1a_2\cdots a_n)$. 此外，循环 $(a_1a_2\cdots a_n)$ 当它包含任意字母 a_i 时就一定包含前一个字母 a_{i-1}，因此 ϕ 还要置换这 n 个字母外剩下来的字母. 现在对符号的个数用归纳法就可推出定理的结论. 特别，m 个字母的恒等置换可表示成 m 个循环之积，每个循环的长度为 1.

反之，显然任意不相交循环之积是一个置换. 此外我们可以证明

定理 17 任意置换 ϕ 的阶等于 ϕ 的不相交循环之长度的最小公倍数.

证明 把置换 ϕ 写成不相交循环 $\gamma_1, \cdots, \gamma_r$ 的乘积 $\phi=\gamma_1\cdots\gamma_r$. 如果 $i\neq j$，则 γ_i 和 γ_j 是不相交的；因此 $\gamma_i\gamma_j=\gamma_j\gamma_i$，并且因子 γ_i 可以在 ϕ 和它的幂中重新排列，从而对所有整数 n，得到 $\phi^n=\gamma_1^n\cdots\gamma_r^n$. 所以 $\phi^n=I$ 当且仅当每个 γ_i^n 是恒等置换. 而根据定理 15，由此可推出，$\phi^n=I$ 当且仅当 n 是 $\gamma_1, \cdots, \gamma_r$ 的长度的公倍数，由此立即得到定理 17 的结论.

根据 § 6.5 的定理 8，每个有限群同构于一个或多个置换群. 特别，这对于由几何图形的对称构成的有限群是正确的，我们现在

① 两个集合不相交是指它们没有公共元素.

用两个例子来说明这一点.

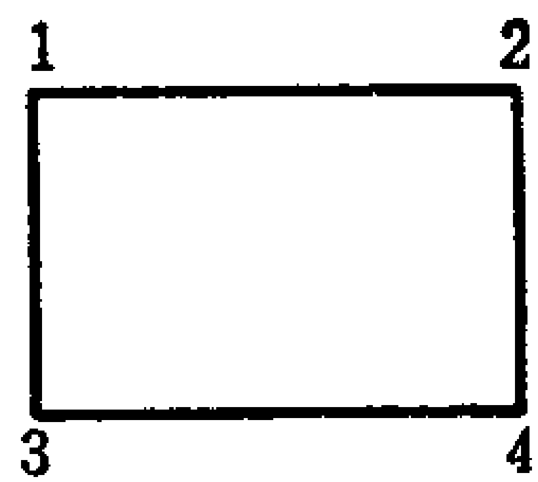


图 5

考虑矩形对称群(图 5). 在这个群中，由下列四个置换

$$I=(1)(2)(3)(4),\quad R=(14)(23),$$
$$H=(13)(24),\quad V=(12)(34)$$

来变换它的顶点. 这个群 被称为四群. 根据定理 8，它同构于置换群

$$\phi_I=(I)(R)(V)(H),\qquad \phi_R=(IR)(HV),$$
$$\phi_H=(IH)(RV),\qquad \phi_V=(IV)(RH).$$

类似地，正方形对称群（§6.1）可以表示为四个顶点的置换群. 利用定理 8，我们也可以把它表示为八个符号的置换群，其中每个符号代表正方形对称群的一个元素. 例如，其中符号 R 对应于一个置换，这个置换的效果是这八个符号用 R 右乘后所得到的元素，我们从正方形对称群表(表 1) 中以 R 为首的那一列看出，这个置换就是 $(IRR'R'')(HD'VD)$. 类似地，符号 H 对应于置换 $(IH)(RD)(R'V)(R''D')$.

相同长度的两个循环有着密切的关系. 例如，如果 $\gamma=(1234)$ 和 $\gamma'=(2143)$，那么我们可以计算出 $\gamma'=\phi^{-1}\gamma\phi$，其中 $\phi=(12)(34)$ 是一个置换，它把循环 γ 中每个数字变换成 γ' 中相应的数字. 这是下面结果的特殊情形.

定理 18 设 ϕ 和 γ 是 m 个字母的置换，其中 γ 是循环置换 $\gamma=(a_1\cdots a_m)$，并用 $\gamma'=(a_1\phi\cdots a_m\phi)$ 表示另一个循环，它是用 γ 表示式中每个 a_i 在 ϕ 作用下所成的象 $a_i\phi$ 来代替 a_i 而得到的. 那么 $\phi^{-1}\gamma\phi=\gamma'$.

证明 乘积 $\phi^{-1}\gamma\phi$ 把每个字母 $a_i\phi$ 先映成 $a_i\phi\phi^{-1}=a_i$，再映成 $a_i\gamma=a_{i+1}$，最后映成 $a_{i+1}\phi$，因此 $\phi^{-1}\gamma\phi$ 作用到 $a_i\phi$ 上的效果与 γ' 作用到 $a_i\phi$ 上的效果相同(记 $a_{m+1}=a_1$). 类似地，我们计算

出，$\phi^{-1}\gamma\phi$ 和 γ' 都把任意不是形为 $a_i\phi$ 的字母 b 变为自身. 因此 $\phi^{-1}\gamma\phi=\gamma'$，如断言所述.

推论 对任意两个置换 ϕ 和 ψ，如果 ψ 写成循环之积 $\psi=\gamma_1\cdots\gamma_r$，那么我们有

$$\phi^{-1}\psi\phi=\gamma_1'\cdots\gamma_r',$$

式中 γ_i' 是从 γ_i 得到的，如定理 18 所述.

习　题

1. 把下列置换 ϕ 表示成不相交循环之积：

   (a) $1\phi=4$, $2\phi=6$, $3\phi=5$, $4\phi=1$, $5\phi=3$, $6\phi=2$;

   (b) $1\phi=5$, $2\phi=3$, $3\phi=2$, $4\phi=6$, $5\phi=4$, $6\phi=1$;

   (c) $1\phi=3$, $2\phi=5$, $3\phi=6$, $4\phi=4$, $5\phi=1$, $6\phi=2$.

求出每个置换的阶.

2. 把下列乘积表示成不相交循环之积：

   (1234)(567)(261)(47),

   (12345)(67)(1357)(163),

   (14)(123)(45)(14).

求出每个乘积的阶.

3. 求置换 $(abcdef)(ghij)(klm)$ 和 $(abcdef)(abcd)(abc)$ 的阶.

4. 把菱形对称群表示成它的四个顶点的置换群.

5. 描述由所有那些把 $\{x_1, x_2\}$ 集合映到自身的 x_1, …, x_6 的置换构成的子群的所有右陪集和左陪集.

6. 哪些对称群是阿贝耳群？

7. 设 G 是由保持一个顶点固定的立方体所有对称构成的群，把 G 表示成这些顶点的置换群(参见 §6.3).

8. (a) 证明：每个置换可写成长度为 2 的循环("对换") 之积 (一般来说，不一定不相交).

   *(b) 这个结论同"由 $ab=ba$ 证明一般交换律"(§1.5)有什么关系？

9. 把等边三角形对称群表示成

   (a) 三个字母的置换群；

   (b) 六个字母的置换群；

*(c) 用两种本质上不同的方式做(b).

*10. 证明: n 次对称群是由循环 $(12\cdots(n-1))$ 和 $((n-1)n)$ 生成的.

*11. 在什么意义下,定理 16 的表达式是唯一的? 证明你的回答.

§ 6.10 偶置换与奇置换

当我们考虑齐次多项式形式

$$P=\prod_{i<j}(x_i-x_j) \qquad (\text{其中 } i, j \text{ 从 } 1 \text{ 跑到 } n)$$

时,就会发现置换的一个重要分类. 当 $n=3$ 时,

$$P=(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_2-x_3)$$
$$=x_1^2x_2+x_2^2x_3+x_3^2x_1-x_1^2x_3-x_3^2x_2-x_2^2x_1,$$

而且 P^2 是 § 5.5 中讨论的判别式. 一般地, P 是 $\frac{n(n-1)}{2}$ 次多项式. 显然, P 中下标的任意置换使 P 的这组因子保持不变, 因此除符号外, P 本身也不变. 而且对换 (x_1x_2) 把 (x_1-x_2) 变为它的负值 (x_2-x_1), 把 (x_1-x_j) 和 (x_2-x_j) 互换 $(j>2)$, 并保持其他因子不变, 因此 (x_1x_2) 把 P 变为 $-P$.

因此全体下标的 $n!$ 个置换分为两类: 保持 P(或 $-P$)不变的置换称为*偶置换*, 把 P 和 $-P$ 互换的置换称为*奇置换*. 由此推出, 当我们考虑相继实行这两类置换的效果时, 有下列法则

$$\begin{array}{c}\text{偶置换}\times\text{偶置换}=\text{奇置换}\times\text{奇置换}=\text{偶置换}\\ \text{偶置换}\times\text{奇置换}=\text{奇置换}\times\text{偶置换}=\text{奇置换}\end{array} \qquad (12)$$

我们用公式 (12) 和定理 11 得出一个推论: 全体偶置换构成 n 次对称群的子群 A_n. 这个子群通常称为 n 阶"交错群".

此外, 如果 β 是固定的奇置换, ϕ 是变化的奇置换, 那么 $\phi\beta^{-1}$ 是偶置换, 所以 $\phi=(\phi\beta^{-1})\beta$ 是在右陪集 $A_n\beta$ 中. 概括地说, 全体奇置换构成 A_n 的单个右陪集. 因此根据拉格朗日定理, n 个符号的"交错群"刚好包含 $\frac{n!}{2}$ 个元素.

n 个未定元 $x_1, \cdots, x_n$ 的多项式 $g(x_1, \cdots, x_n)$，如果在它的下标置换的对称群作用下它是不变的，则称 $g(x_1, \cdots, x_n)$ 为"对称"多项式. 特殊对称多项式是(对 $n=3$)

$$\sigma_1 = x_1 + x_2 + x_3,\ \sigma_2 = x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3,\ \sigma_3 = x_1x_2x_3. \tag{13}$$

它们是下面展开式的系数

$$(t-x_1)(t-x_2)(t-x_3) = t^3 - \sigma_1 t^2 + \sigma_2 t - \sigma_3. \tag{14}$$

一般地，我们称这样的多项式为*初等对称多项式*(n 个变量)，它们是

$$\begin{aligned} &\sigma_1 = \sum_i x_i, \qquad \sigma_2 = \sum_{i<j} x_i x_j, \\ &\sigma_3 = \sum_{i<j<k} x_i x_j x_k, \cdots, \sigma_n = x_1 \cdots x_n. \end{aligned} \tag{15}$$

因为 $(-1)^k \sigma_k$ 是 $p(t) = \prod_k (t - x_k)$ 作为 t 的多项式的展开式中 t^{n-k} 的系数. 这些表达式 σ_i 给出 $p(t)$ 的系数，这些系数为 $p(t)$ 的根的函数. 从所谓"对称多项式基本定理"可推导出初等对称多项式的很多重要性质. 现在我们不加证明地①叙述这个定理.

定理 19 *任意对称多项式 $p(x_1, \cdots, x_n)$ 可表示为初等对称多项式的多项式.*

例如，在两个变量 x 和 y 的情况下，

$x^2 + y^2 = (x+y)^2 - 2xy = \sigma_1^2 - 2\sigma_2,$

$x^3 + y^3 = (x+y)^3 - 3xy(x+y) = \sigma_1(\sigma_1^2 - 3\sigma_2)$，等等

即使多项式 $q(x_1, \cdots, x_n)$ 不是对称的，我们至少也可以要求找出保持多项式不变的所有那些下标置换组成的集合. 显然这个集合是一个群；它称为多项式群.

---

① 参见 L. Weisner, *Introduction to the Theory of Equations* (New York: Macmillan, 1938), p 108. 也可参见 § 15.6 定理 15 的推论.

习　题

1. (a) 列出三个字母的奇置换.

(b) 列出四个字母的奇置换.

2. 对哪些正整数 n，长度为 n 的循环是偶置换？对哪些正整数 n，长度为 n 的循环是奇置换？

3. (a) 证明：若干个循环(不一定不相交)的乘积是奇置换当且仅当它包含着奇数个长度为偶数的循环.

(b) 置换(123)(246)(5432)和(12)(345)(67)(891)是奇置换还是偶置换？

4. (a) 构造 11 个字母的 14 阶偶置换和奇置换的例子.

(b) 证明每个 8 个字母的 10 阶置换是奇置换.

5. 证明：一个置换是偶置换当且仅当它可以写成偶数个对换(§6.9习题 8)之积.

*6. 证明：每个偶置换可以写成长度为 3 的循环之积.

7. 求出下列每个多项式的多项式群：

$$x_1x_2+x_3x_4,\qquad x_2x_1+x_3x_2+x_2x_4,$$
$$x_1^2x_2+x_3x_4^2+x_1^2x_3+x_2x_4^2.$$

8. 用初等对称多项式表示下列多项式：

$$x^2+y^2+z^2,\ x^2y+y^2z+z^2x+x^2z+y^2x+z^2y.$$

§6.11　同　态

从群 G 到群 G' 的单值变换可以保持乘法，但不是一一的(也就是说，这个变换不是同构).

例如，考虑 n 次对称群和 ±1 在乘法之下构成的群之间的对应，这个对应把偶置换映射到 $+1$，把奇置换映射到 -1，由公式(12)，它把乘积映射到乘积.

或者考虑对应 $n\mapsto i^n$，其中 $i=\sqrt{-1}$，这是整数加法群和四次单位根的乘法群之间的对应. 它也保持了群的运算：$i^{m+n}=i^mi^n$，但这个对应是多一的.

这些例子和其他的例子引出下面的概念.

定义 把群 G 映射到群 G' 的单值变换 $x\mapsto x'$，如果对 G 中一切 x, y 有 $(xy)'=x'y'$，则称这个变换为群 G 到群 G' 的同态.

定理 20 在任意同态 $G\to G'$ 之下，G 的单位元素映射到 G' 的单位元素，G 的逆元素映射到 G' 的逆元素.

证明 因为 $e^2=e$，所以 e 的象 f 满足 $f^2=f=fe'$，这里 e' 是 G' 的单位元素. 因此根据消去律有 $f=e'$，所以 G 的单位元素一定映射到 G' 的单位元素. 同样，如果 a 映射到 a'，a^{-1} 映射到 $(a^{-1})'$. 那么 $aa^{-1}=e$ 一定映射到 $a'(a^{-1})'=e'$，所以 $(a^{-1})'$ 是 a' 的逆元素.

推论 1 循环群的任意同态象①是循环群.

因为根据定理 20，不论 m 是正整数，零或负整数，都有 $(a^m)'=(a')^m$，因此，如果群 G 由所有幂 a^m 构成，那么群 G' 也由 a' 的所有幂 $(a')^m=(a^m)'$ 构成.

推论 2 在群 G 到群 G' 的同态之下，G 中映射到 G' 的单位元素 e' 的所有元素组成的集合 N 是 G 的一个子群.

这个集合 N 称为这个同态的核.

因为 $e\mapsto e'$，所以 N 是非空的. 再根据定理 20 和假设条件，由 $a\mapsto e'$ 和 $b\mapsto e'$ 可推出 $a^{-1}\mapsto(a')^{-1}=(e')^{-1}=e'$ 和 $ab\mapsto a'b'=e'e'=e'$，因此 N 是一个子群.

直积 任意两个群 G 和 H 有直积 $G\times H$，$G\times H$ 的元素都是有序对 (g, h)，其中 $g\in G$，$h\in H$；$G\times H$ 中的乘法由下面公式定义:

$$(g, h)(g', h')=(gg', hh'). \tag{15a}$$

显然，(e, e) 在 $G\times H$ 中起单位元素的作用；(g^{-1}, h^{-1}) 是 (g, h) 的逆元素，并且乘法满足结合律；因此 $G\times H$ 是一个群. 此外，函数

① 同态映上有时称为满同态，于是相应地称同态象为满同态象.

$\alpha(g,h)=g$ 定义一个从 $G\times H$ 到 G 上的同态 α, 函数 $\beta(g,h)=h$ 定义一个从 $G\times H$ 到 H 上的同态 β.

还可以证明，每个有限阶的阿贝耳群与阶为素数幂循环群的直积同构. 我们这里只需用下面比它更弱的结果.

定理 21 设 m 和 n 互素，则 m 阶循环群和 n 阶循环群的直积是一个 mn 阶循环群.

证明 设 a 和 b 分别生成循环群 A 和 B, 其阶分别为 m 和 n. 那么, 在 $C=A\times B$ 中, $(a,b)^k=(a^k,b^k)$ 是单位元素 (e,e) 当且仅当 $k\equiv 0 \pmod m$, $k\equiv 0 \pmod n$. 根据 §1.9 定理17, 这就意味着 $k\equiv 0 \pmod{mn}$, 因此 $(a,b)=c$ 是 C 中 mn 阶元素，C 只包含 mn 个元素, 所以它是循环群. 证毕

习 题

1. 在同态 $n\mapsto i^n$ (其中 $i=\sqrt{-1}$, $n\in\mathbf{Z}$) 下, 求出同态核.

2. 证明: 8 阶循环群有同态象为

   (a) 4 阶循环群, (b) 2 阶循环群.

3. 把每个 x 映射到复数 $e^{2\pi ix}$ 上的对应是所有实数 x 构成的加法群的同态吗？如果是, 那么它的同态象是什么？它的同态核是什么？

4. 设 G 是 n 个字母 $1,2,\cdots,n$ 的某些置换组成的群, G 中每个置换 ϕ 把字母 $1,2,\cdots,k$ 的子集合映射到自身, 又设 G' 是字母 $1,2,\cdots,k$ 的全体置换 ϕ^* 组成的群, 证明群 G 满同态于群 G'.

5. 在正方形中, 设两条对角线为 d 和 d', 两个轴是 h 和 v. 证明: 存在一个同态 $\phi\mapsto\phi^*$, 在这个同态下, 正方形对称群的每个运动 ϕ 诱导出关于 d, d', h 和 v 的置换 ϕ^*. 详细列出对应 $\phi\mapsto\phi^*$. 它的同态核是什么？

6. 证明: 如果 G 同态于 G', G' 同态于 G'', 那么 G 同态于 G''.

7. 下列这些对应中, 哪些是所有非零实数的乘法群到自身的同态？如果对应是同态, 指出它的同态象 G' 和同态核.

   (a) $x\mapsto|x|$, (b) $x\mapsto 2x$,

   (c) $x\mapsto x^2$, (d) $x\mapsto\frac{1}{x}$,

(e) $x\mapsto -x$, (f) $x\mapsto x^3$,

(g) $x\mapsto -\dfrac{1}{x}$, (h) $x\mapsto \sqrt{x}$.

8. 证明：四群是两个 2 阶循环群的直积.

*9. 证明：所有非零复数组成的乘法群是单位圆的旋转群和非零实数的乘法群的直积.（提示：设 $z=re^{i\theta}$.）

10. 证明：对任意群 G, H, K, 有 $G\times H$ 与 $H\times G$ 同构, $G\times(H\times K)$ 与 $(G\times H)\times K$ 同构.

§6.12 自同构·共轭元素

定义 群 G 同它自身的同构称为 G 的自同构. 于是 G 的自同构 α 就是 G 到自身之上的一一变换（G 的双射），并满足

$$(xy)\alpha=(x\alpha)(y\alpha), \text{ 对 } G \text{ 中一切 } x, y. \tag{16}$$

定理 22 任意群 G 的全体自同构构成一个群 A.

证明 （参看定理 6）显然，恒等变换是自同构，并且任意两个自同构的乘积也是自同构. 最后，如果 $x\mapsto x\alpha$ 是一个自同构，那么由(16)式，有

$$\begin{aligned}(xy)\alpha^{-1}&=[(x\alpha^{-1}\alpha)(y\alpha^{-1}\alpha)]\alpha^{-1}\\&=\{[(x\alpha^{-1})(y\alpha^{-1})]\alpha\}\alpha^{-1}\\&=(x\alpha^{-1})(y\alpha^{-1}).\end{aligned}$$

所以 α^{-1} 是一个自同构. 证毕

一个平行的定义和定理可用到整环上，实际上，上述内容一般可应用到抽象代数系统上. 我们可以把一个抽象代数系统 A 的自同构恰恰看作 A 的对称.

定义 在任意群 G 中, $a^{-1}xa$ 称为元素 x 在由 a 共轭变换之下的共轭元素（或简称 x 在 a 之下的共轭）.

在定理 18 中我们已经看出，在置换群中，任意循环的共轭是另一个具有相同长度的循环. 在任意变换群中也有一个类似的说

法. 例如, 如果 α 和 ϕ 是空间 S 到自身上的一一变换, 则 $\psi=\alpha^{-1}\phi\alpha$ 与 ϕ 的关系如同定理 18 中所说的那样. 特别, S 中的任意点 q 可以写为 $q=p\alpha$, 这里 p 是 S 中某一点, 并有

$$(p\alpha)\psi=p\alpha(\alpha^{-1}\phi\alpha)=(p\alpha\alpha^{-1})\phi\alpha=(p\phi)\alpha.$$

于是 ψ 是变换 $p\alpha\mapsto(p\phi)\alpha$; 换句话说, ϕ 在 α 之下的共轭 $\psi=\alpha^{-1}\phi\alpha$ 是由 ϕ 按下面方式得到: 每点 p 和它的象 $r=p\phi$ 分别用 $p\alpha$ 和 $r\alpha$ 代替. 例如, 在正方形群中, $V=R^{-1}HR$ 表明, 关于垂直轴的反射是关于水平轴的反射在 R 之下的共轭, 这因为 R 把水平轴映射到垂直轴.

定理 23 对群 G 的任意固定元素 a, 共轭变换 $T_a: x\mapsto a^{-1}xa$ 是 G 的一个自同构.

证明 对所有 x, y, 有

$$(a^{-1}xa)(a^{-1}ya)=a^{-1}(xy)a.$$

形为 $x\mapsto a^{-1}xa$ 的自同构 T_a 称为内自同构. 所有其他自同构称为外自同构.

可以验证, 正方形对称群有四个不同的内自同构, 有四个外自同构. 另一方面, 三阶循环群除了恒等变换之外没有内自同构, 但是它有外自同构 $x\leftrightarrow x^2$.

定理 24 任意群 G 的全体内自同构构成 G 的自同构群的一个子群.

证明 因为 $b^{-1}(a^{-1}xa)b=(ab)^{-1}x(ab)$, 所以内自同构 T_a 和 T_b 的乘积是内自同构 T_{ab}; 类似地, 因为 $(a^{-1})^{-1}(a^{-1}xa)(a^{-1})=x$, 所以共轭变换(或自同构) T_a 的逆是 $T_{a^{-1}}$.

定义(伽罗瓦(Galois)) 群 G 的子群 S 是 G 中正规子群当且仅当它在 G 的所有内自同构作用之下不变(也就是说, S 在包含每个元素的同时, 也必包含这个元素的所有共轭元素).

正规子群有时称为自共轭子群或不变子群.

例如，正方形的旋转群是正方形对称群的正规子群；子群$[I, R^2]$也是正规子群. 再有，阿贝耳群的每个子群都是正规子群，因为对所有的x和a，有$a^{-1}xa=a^{-1}ax=x$. 还有，平面的平移群是平面所有刚体运动的欧几里得群的一个正规子群(参看第九章).

定理 25 任意同态$\theta:G\to H$的核N是G的正规子群.

证明 根据定理 20 的推论 2 知，N是G的子群. 再有，如果$a\in N$，$b\in G$，则

$$\theta(b^{-1}ab)=b'^{-1}\theta(a)b'=b'^{-1}e'b'=e',$$

其中$b'=\theta(b)$，$e'=\theta(e)$，这是因为，根据定理 20，有

$$\theta(b^{-1})=[\theta(b)]^{-1}.$$

一般地，设$a^{-1}Sa$表示所有乘积$a^{-1}sa$(这里s在S中)的集合. 那么这个定义表明，S是正规子群当且仅当对G中每个a，集合$a^{-1}Sa$等于S.

定理 26 子群S是正规的当且仅当它的所有右陪集都是它的左陪集.

证明 如果S是正规的，则对所有的a有

$$aSa^{-1}=(a^{-1})^{-1}Sa^{-1}=S;$$

因此$sa\ (s\in S)$的集合Sa同由$(asa^{-1})a=as(s\in S)$组成的集$(aSa^{-1})a$一样，于是对所有的a，有$Sa=aS$. 反过来，如果右陪集Sa是左陪集bS，则$a^{-1}Sa=a^{-1}bS$包含元素$e=a^{-1}ea$，而左陪集$eS=S$也包含元素e，根据§6.8 引理 2，所以$a^{-1}Sa=S$.

这个定理的一个推论是，只有一个陪集的任意子群S是正规子群；不在S中的全体元素构成S的右陪集和左陪集. 因此交错群是n次对称群的正规子群.

注 考虑群G的元素a和由a诱导出的内自同构T_a之间的对应. 根据定理 24 的证明，有$T_aT_b=T_{ab}$，这保留了乘法运算. 然而，如正方形的对称群中那样，这个对应通常不是一一的(R^2和I

诱导出同一个内自同构)；它是一个同态. 我们容易验证，这个同态的核恰是G的中心.

习　题

1. p阶循环群有多少自同构？pq阶循环群呢？这里p，q是不同的素数.

2. 列出四群的全部自同构，哪些是内自同构？

3. 求出8阶循环群的全部自同构.

4. 证明：m阶循环群的自同构是对应$a^k \mapsto a^{rk}$，这里r是环$\mathbf{Z}_m$的单位.

5. 证明：在任意群中，“x与y共轭”是一个等价关系.

6. 证明：群的元素a诱导出恒等的内自同构当且仅当a在群的中心里.

*7. (a) 求出正方形对称群的一个自同构α，适合$R\alpha=R$，$H\alpha=D$.

(b) 证明α是外自同构.（提示：正方形对称群可用§6.6中讨论过的生成元R和H来表示.）

8. 证明：如果G和H是同构群，那么G和H之间不同的同构个数等于G的自同构个数.

9. 列举正方形对称群的全体内自同构、共轭元素集合和正规子群.

*10. 设G是任意群，A是G的自同构组成的群. 证明：全体偶(α, g)（其中$\alpha\in A, g\in G$）在乘法$(\alpha, g)(\alpha', g')=(\alpha\alpha', (g\alpha')g')$之下构成一个群(称为$G$的“全形”).

*11. (a) 证明：3阶循环群的全形是3次对称群.

(b) 证明：4阶循环群的全形是正方形对称群.

12. 证明：如果M和N都是群G的正规子群，那么它们的交也是G的正规子群.

13. 证明：如果M和N都是群G的正规子群，那么所有乘积xy($x\in M$, $y\in N$)构成的集合MN是G的正规子群.

14. 证明：任意群G的全体内自同构是G的所有自同构构成的群的正规子群.

*15. (a) 证明：对每个有理数$c\neq 0$，对应$x\mapsto xc$是有理数加法群的自同构.

(b) 证明：有理数加法群没有其他自同构.

*16. 设G是pq阶(p,q为素数)群. 证明：G或者是一个循环群，或者包含一个p(或q)阶元素. 在第二种情形中证明，G或者包含一个正规子群，或者包含q个p阶共轭子群. 对后一种情形，证明，$pq-q(p-1)=q$个非p阶元素构成正规子群. 推出G总有一个正规真子群.

*17. (a) 证明：如果$k^n\equiv 1(\mathrm{mod}\ m)$，那么定义关系$a^m=b^n=e$，$b^{-1}ab=a^k$确定了一个具有$m$阶正规子群的$mn$阶群.

(b) 利用习题16找出全部6阶群和15阶群.

*18. 利用习题16找出全部10阶群和14阶群.

*19. 运用习题16的分析，证明：阶数为任意给定素数的平方的群中只有两个不同构.

*§6.13 商 群

现在我们将指出怎样构造某一特定的抽象群G的所有同态象G'的同构.

诚然，设$x\mapsto x'$是群G到群G'上的任意同态，并设N是这个同态的核. 如果a和b是G的任意元素，则我们可写成$b=at$，因此$b'=a't'$. 但是根据消去律，$a't'=a'$当且仅当$t'=e'$，也就是当且仅当$t\in N$. 总之，$b'=a'$当且仅当$b=at\ (t\in N)$.

引理1 G的两个元素在G'中有同一个象当且仅当它们是在核N的同一个陪集$Nx=xN$中.

这就建立起G'的全体元素与核N在G中的全体陪集之间的一一对应. 因此G'的阶等于核N在G中的陪集的个数(或称指数).

引理2 设x'和y'是G'的元素，那么$x'y'$可按下述方式求出. 设Nx和Ny分别对应着x'和y'，$NxNy$是所有乘积$uv\ (u\in Nx, v\in Ny)$组成的集合；那么$x'y'$与包含着集合$NxNy$的N的(唯一)陪集相对应.

证明 如果$u=ax, v=by\ (a,b\in N)$，那么

$$(uv)'=a'x'b'y'=e'x'e'y'=x'y'.$$

于是在同构意义下，G' 可由 G 和 N 来确定，即 G' 同构于 N 在 G 中的陪集的集合，这个集合的乘法运算法则是：两个陪集的乘积 $Nx\circ Ny$ 是包含所有乘积 $uv(u\in Nx, v\in Ny)$ 的(唯一)陪集.

我们可以用正方形对称群 G 同四群 G'：$[e,a,\ b,\ c]$ (§ 6.8) 之间的同态来说明上述的讨论. 在这个同态之下，$[I,\ R^2]\mapsto e$，$[R,R^3]\mapsto a$，$[H,\ V]\mapsto b$，$[D,\ D']\mapsto c$. (从正方形群表可以验证这是一个同态!) e 的原象 $[I,\ R^2]$ 构成正规子群，而其他元素的原象是 $[I,\ R^2]$ 的陪集. 最后，通过计算乘积 $[RH,RV,\ R^3H,\ R^3V]$，可以推导出一个典型的运算法则 $ab=c$. 这些乘积在（实际上是构成）c 的原象陪集 $[D,D']$ 之中.

反过来，设 N 是 G 的任意给定的正规子群，它与任何同态都没有事先的联系. 我们可以由 N 出发构造 G 的同态象 G'，如下所述.

把 G' 的元素定义为 N 的不同的陪集 Nx. N 的任意两个陪集 Nx 和 Ny 的乘积 $Nx\circ Ny$ 定义为包含所有乘积 $uv(u\in Nx, v\in Ny)$ 的集合 $NxNy$ 的陪集. 如果 $u=ax$，$v=by$，其中 $a,b\in N$，则 $uv=axby=ab'xy$，这里 $b'=xbx^{-1}$ 也在 N 中，这因为 N 是正规子群. 因此 $N(xy)$ 是一个包含 $NxNy$ 的陪集；此外，因为不同的陪集是不相交的，并且集合 $NxNy$ 是非空的，因此不存在两个不同的都包含 $NxNy$ 的陪集.

于是我们就对 G' 的全体元素(又是 G 的所有陪集)定义了一个单值二元运算，它可以写成

$$Nx\circ Ny=N(xy). \tag{17}$$

口头上说就是，任意两个陪集的乘积可以通过在 G 中把任意一对"代表元素" x 和 y 相乘，并构成包含乘积 xy 的陪集来求出. 根据公式(17)，乘积 $Ne\circ Ny=N(ey)=Ny$，所以陪集 $N=Ne$ 是这个陪集集合的左单位元素，又因陪集 $(Nx\circ Ny)\circ Nz$ 和 $Nx\circ(Ny\circ Nz)$

二者都包含$(xy)z=x(yz)$，所以陪集的乘法满足结合律. 最后，陪集 $Nx^{-1}\circ Nx$ 包含元素 $x^{-1}x=e$，所以必有 $Nx^{-1}\circ Nx=Ne=N$，因此陪集的左逆元素存在. 这些结果同定理 4 一起可以证明下面的

引理 3 *G 的任意正规子群 N' 的全体陪集构成一个乘法群.*

定义 *N 的陪集群称为 G 对 N 的商群(或因子群)，并用 G/N 表示*①.

由(17)式知，对应 $x\mapsto Nx$ 是 G 到 G/N 上的一个同态，并且这个同态的核是 N.

反之，我们已经看到(根据引理 2)，对群 G 到群 G' 上的任意同态，如果同态核是 N，那么同态象 G' 与商群 G/N 同构. 我们得出

定理 27 *一个给定的抽象群 G 的同态象是 G 对它的不同正规子群的商群 G/N，N 的陪集的乘法通过公式(17)来定义.*

注 从群和正规子群来构造商群类似于从整数环来构造模 n 整数环(§ 1.9, § 1.10). N 的陪集类似于模 n 的剩余类. 如果把 $x\equiv y(\mathrm{mod}N)$ 定义为关系$xy^{-1}\in N$，则这个关系与关系$x\equiv y(\mathrm{mod}n)$平行. $xy^{-1}\in N$ 等价于断言: x 和 y 在N的同一个陪集中(见 § 6.8 习题 6).

习　题

1. 列出所有抽象群，它们是正方形对称群的同态象.

2. 列出所有抽象群，它们是正六边形对称群的同态象.

3. 证明: 任意群 G 的中心 Z 是 G 的正规子群, G/Z 与 G 的内自同构群同构.

4. 证明: 在 § 6.8 的习题 6 中, 由 $x\equiv y(\mathrm{mod}\ S)$ 可推出对所有的 a 有 $ax\equiv ay(\mathrm{mod}\ S)$ 当且仅当 S 是正规子群.

5. 设 G 是所有形为 $2^k3^m5^n$ 的有理数构成的群，这里指数 k, m, n 为整

① 如果G是阿贝耳群，这个群中的二元运算用"+"表示，那么每个子群N是 G 中的正规子群，这时商群常常称为差群，并记作 $G-N$.

数，而 S 是所有数 2^k 构成的乘法群.

(a) 描述 S 的全体陪集，　　(b) 描述 G/S.

6. 设 $G\to G'$ 是一个同态，证明：G' 的任意子群 S' 的所有原象的集合是 G 的子群 S，并且，如果 S' 是正规子群，那么 S 也是正规子群.

*7. 设 S 是群 G 的一个子群，而 N 是群 G 的正规子群. 证明：如果 $S\cap N=e$ 且 $S\cup N=G$，那么 G/N 与 S 同构.

*8. 设 G 是一个群，形为 $x^{-1}y^{-1}xy$ 的元素称为换位子，证明：所有这样的换位子的乘积组成的集合 C 构成 G 的正规子群.

*9. 在习题 8 中，证明：G/C 是阿贝耳群. 最后证明：如果 N 是 G 的正规子群，并且 G/N 是阿贝耳群，那么 N 包含 C.

*10. 群 G 的两个子群 S 和 T，如果对某个 $a\in G$ 有 $a^{-1}Sa=T$，则称它们是共轭的. 证明：G 的任意子群 S 和它的共轭的交是 G 的正规子群.

*11. (a) 证明：如果 M 和 N 是 G 的正规子群，并有 $M\cap N=e$，那么对一切 $a\in M$，$b\in N$，有 $ab=ba$.（提示：证明 $aba^{-1}b^{-1}\in M\cap N$.）

*(b) 证明：在(a)中，如果 $M\cup N=G$，那么 $G=M\times N$.

*12. 设 G 是任意群，S 是 G 的任意子群. 对任意 $a\in G$，设 T_a 是 S 的全体右陪集 Sx 上的置换 $Sx\mapsto Sxa$. 证明：

(a) 对应 $a\mapsto T_a$ 是同态.

(b) 同态核是习题 10 所说的正规子群.

*13. 证明：非正规子群的全体陪集在乘法(17)意义下不能构成群.

*§ 6.14　等价关系与同余关系

在定义整数之间的关系 $a\equiv b\pmod{n}$ 时，在通过数偶的同余关系 $(a,\ b)\equiv(a',\ b')$（这个同余关系的意思是 $ab'=a'b$）来构造有理数时，还有其他地方，我们曾断言过，任何满足自反律、对称律和传递律的关系可以看作与相等是一类关系. 我们现在系统地讲这个断言的意义.

为方便起见，把满足自反律、对称律和传递律的关系 R，即对集合 S 的一切元素 a, b, c，有性质

$$aRa,$$

由 aRb 可推出 bRa,

由 aRb 和 bRc 可推出 aRc,

称为S上的等价关系. 如果象在陪集的情形(§ 6.13)中,我们把S的适当子集当作元素处理, 这样等价关系R就变成了通常的相等关系. 事实上, 如果a是S的任意元素, 我们则可用$R(a)$表示与a等价的所有元素b的集合; $b\in R(a)$ 当且仅当 bRa. 这样一些R-子集具有各种简单性质.

引理 1 由 aRb 可推出 $R(a)=R(b)$, 反之亦真.

证明 首先假定aRb, 并设c是$R(a)$的任意元素. 那么根据定义有cRa, 因此再根据传递律得cRb, 这就意味着$c\in R(b)$. 反过来, 由对称律得bRa, 所以由$c\in R(b)$推出$c\in R(a)$, 这就意味着两个集合$R(a)$和$R(b)$具有相同的元素, 因此$R(a)=R(b)$.

现在假定$R(a)=R(b)$. 根据自反律有bRb, 所以$b\in R(b)$, 因为$R(a)=R(b)$, 这意味着$b\in R(a)$, 于是aRb, 这就完成了引理的证明.

在R是整数之间的模n同余关系的特殊情形中, 由整数a确定的集合$R(a)$就是包含整数a的剩余类. 这里, 引理1特别给出断言: $a\equiv b \pmod n$当且仅当a和b属于模n的同一个剩余类(参看§1.10). 其他的说明留作习题.

再有, 模n全部剩余类把整数的整个集合$\mathbf{Z}$分成不相交的子类, 因此可以说这构成了$\mathbf{Z}$的一个"分划". 一般地, 类S的分划π是把S划分成子类$A, B, C, \cdots$,使得S的每个元素属于一个且仅属于一个子类(子集合). R-子集总提供这样的一个分划.

引理 2 两个R-子集或者相等, 或者它们没有公共元素, 并且所有R-子集的全体构成S的一个分划.

证明 如果$R(a)$和$R(b)$包含公共元素c, 于是cRa并且cRb, 那么根据对称律和传递律有aRb. 根据引理1这意味着

$R(a)=R(b)$. 所以，如果 $R(a)\neq R(b)$，这两个类不能重迭. 最后，集合 S 的每个元素 c 在特定的 R-子集 $R(c)$ 中，这是因为，根据自反律有 cRc，所以 $c\in R(c)$.

引理 2 的逆命题可直接证得. 如果集合 S 被分划 π 分成不相交的子类 $A, B, C, \cdots$，那么关系 aRb 可以定义为 a 和 b 属于这个分划的同一个子类中，这就给出 S 上的一个抽象的等价关系 R. 此外，通过每个元素 a 依这个关系确定的 R-子集恰是按分划 π 给出的包含 a 的子类. 这些结论可以概括如下：

定理 28 集合 S 上的每个等价关系 R 确定 S 的一个分划 π，它把 S 分成不相交的 R-子类. 反过来，S 的每个分划 π 产生一个等价关系 R. 于是存在一个 S 上全体等价关系 R 和 S 的全体分划 π 之间一一对应 $R\leftrightarrow\pi$，使得 S 的元素 a 和 b 属于分划 π 的同一个子类当且仅当 aRb.

在讨论一个可容许的相等关系(§ 1.11)的必要条件时，我们还需要某个与二元运算有关的"代换性质". 利用集合 S 上的等价关系 R 和二元运算 $a\circ b=c$，这个性质可写成形式

由 aRa' 和 bRb' 可推出

$$(a\circ b)R(a'\circ b'). \tag{18}$$

这个条件有着确定的理论含义.

事实上，设 R 是 S 上的任意等价关系，又设 π 是相应的分划，它把 S 分成 R-子集 $A, B, C, \cdots$，同陪集的情况一样，我们把 R-子集看作新系统 $\Sigma=S/R$ 的元素. 同商群(或模 n 剩余类)的情况一样，我们可以由 S 中的二元运算来定义 Σ 中的二元运算，

在 Σ 中，$A\circ B=C$ 当且仅当
在 S 中，由 $a\in A$ 和 $b\in B$ 推出 $(a\circ b)\in C$. (19)

性质(18)是说，如果 a 和 a' 两个元素都在 R-子集 A 中(即，aRa')，并且 b 和 b' 都在 R-子集 B 中，那么 $(a\circ b)$ 和 $(a'\circ b')$ 都属于同一个

R-子集中. 于是,这个运算得到的 R-子集 C 便由 A 和 B 唯一确定,并且在(19)式意义下,C 就是 A 和 B 的乘积 $A\circ B$. 换句话说,代换性质(18)等价于断言: 定义(19)产生一个 R-子集(即 Σ)上的单值二元运算. 这就证明了

定理 29 已知集合 S 上的一个等价关系 R, 定义在 S 上并具有代换性质(18)的任意二元运算产生一个 S 的 R-子集上的如(19)式定义的单值二元运算.

例如,设 R 是整数集合上的模 n 同余关系,加法和乘法都具有代换性质(18),于是定理 29 产生出 $\mathbf{Z}_n$(§1.10中定义的)中剩余类的加法和乘法. 更一般地,定理 29 可以应用到关系 $a-b\in C$ 上,这里 C 是任意交换环中的任意理想,甚至可以推广到其他代数系统,这个系统的运算不一定是二元的. 一般说,满足定理 29 条件的关系称为“同余关系”. 类似地,同构、自同构和同态等概念可以应用到一般的代数系统. 例如,如果 G 和 H 是具有三元运算 (a, b, c) 的代数, 那么 G 到 H 上的同态是具有下面性质的 G 到 H 上的映射 θ,这个性质是,对 G 中一切 a, b, c 有

$$(a, b, c)\theta=(a\theta, b\theta, c\theta).$$

习 题

1. 下列关系 R 中,哪些是等价关系? 如果是,描述一下 R-子集.
   (a) G 是群, S 是子群, aRb 意味着 $a^{-1}b\in S$.
   (b) G, S 如(a)中所述, aRb 意味着 $ba^{-1}\in S$.
   (c) $\mathbf{Z}$ 是整数环, aRb 意味着 $a-b$ 是素数.
   (d) $\mathbf{Z}$ 是整数环, aRb 意味着 $a-b$ 是偶数.
   (e) $\mathbf{Z}$ 是整数环, aRb 意味着 $a-b$ 是奇数.

2. 设 G 是字母 $x_1, \cdots, x_n$ 的置换群, 设 x_iRx_j 意味着对某个 $\phi\in G$ 有 $x_i\phi=x_j$, R 是等价关系吗? G 是怎样作用在每个 R-子集上?

3. 设 G 是由全体平面的变换 $(x, y)\mapsto(x+a, y)$ 组成, 设 $(x, y)R(x', y')$

意味着对某个 $\phi\in G$ 有 $(x,y)\phi=(x',y')$. 在这种情况下, R- 子集是什么?

4. 设 a 和 b 是实数, 设 aRb 意味着 $a-b$ 是 360 的整数倍.

(a) R 是等价关系吗?

(b) 它是加法同余关系吗?

(c) 它是乘法同余关系吗?

(d) 看作角度的加法和乘法, 从这里可推出些什么?

5. (a) 设 C 是交换环中任意理想, 证明: 关系 $a-b\in C$ 对于加法和乘法是同余关系.

(b) 如果 R 是交换环上的任意同余关系, 那么, 当加法和乘法用公式(19)定义时, 全体 R- 子集构成另一个交换环.

6. 在习题 1(a) 中, 证明: 代换性质(18) 的一半对任意子群 S 都成立, 并证明(18)的另一半成立当且仅当 S 是正规子群.

7. 设 $\circ: S^2\to S$ 是二元运算, R 是 S 上的等价关系. 证明: 如果由 aRa' 推出 $(a\circ b)R(a'\circ b)$ 和 $(b\circ a)R(b\circ a')$, 那么(18)式成立.

第七章 矢量与矢量空间

§7.1 平面矢量

在物理学中出现一些称为矢量的物理量，它们不单纯是数量，它们除了有数量大小之外还具有方向. 例如，平面上的一个平行移动，它的效果不仅依赖于移动的距离，而且还依赖于移动的方向. 为方便起见，我们可以把平行移动表示成具有适当长度和方向的箭头 α (图 1). 两个这样的平行移动 α 和 β，表示做完一个平移之后再接着做另一个平移，它们的联合效果就是"总"位移 γ. 如果先做平移 α 后做平移 β，而箭头 β 的始端位于箭头 α 的终端，那么总位移 $\gamma=\alpha+\beta$ 就是连接 α 的始端和 β 的终端的箭头. 这是以 α 和 β 为边的平行四边形的对角线，这个求 $\alpha+\beta$ 的法则就是所谓的矢量加法的平行四边形法则.

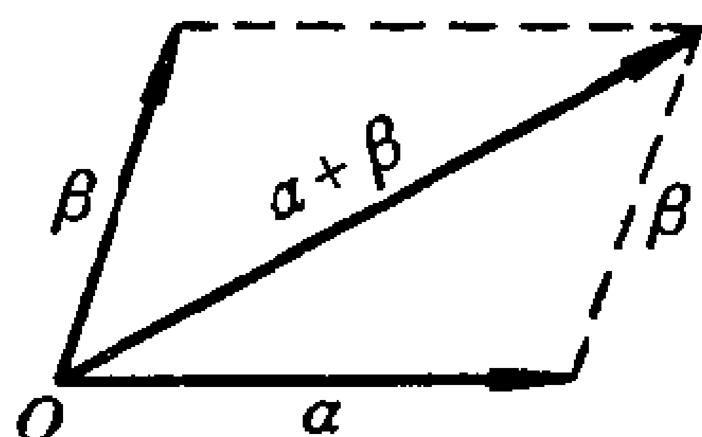


图 1

一个位移 α 可以放大三倍得到新的位移 3α，或者取半得到位移 $\frac{1}{2}\alpha$. 我们甚至可以构成它的负倍数，例如 -2α，它表示一个大小是 α 的两倍，方向与 α 相反的位移. 一般地，α 可以乘上任意实数 c 构成新位移 $c\alpha$，当 c 为正数时，$c\alpha$ 的方向与 α 相同，$c\alpha$ 的大小是 α 的 c 倍，而当 c 是负数时，方向必相反. 数 c 称为标量(或纯量)，乘积 $c\alpha$ 称为"数乘"积.

平面中作用于一点的力，以及速度和加速度，都有类似的矢量表示，在所有这些情形中，矢量加法的平行四边形法则和(实)数乘运算，具有同位移情形一样的涵义. 这就说明了"各种不同的物理状态可以有相同的数学表示"这样一个原理.

解析几何提出了用实数偶来表示平面矢量的方法．我们可以用始端在(0, 0)，终端在相应的点(a_1, a_2)的箭头α表示任何这样的矢量，其中坐标a_1, a_2是实数．那么矢量的和及“数乘”积的坐标可以通过各矢量的坐标利用下面法则计算：

$$(a_1, a_2)+(b_1, b_2)=(a_1+b_1, a_2+b_2), \tag{1}$$

$$c(a_1, a_2)=(ca_1, ca_2). \tag{2}$$

从这些法则我们容易得到矢量代数①的各种定律，例如

$$\alpha+\beta=\beta+\alpha, \quad \alpha+(\beta+\gamma)=(\alpha+\beta)+\gamma, \tag{3}$$

$$c(\alpha+\beta)=c\alpha+c\beta, \quad 1\cdot\alpha=\alpha, \tag{4}$$

等等．这些当中有很多(特别是矢量加法的交换律)还对应着几何原理．

矢量运算可以用来表达很多熟悉的几何概念．例如，矢量$\alpha=(a_1, a_2)$的终端到矢量$\beta=(b_1, b_2)$的终端之间的连线中点可以用公式$\left(\frac{a_1+b_1}{2}, \frac{a_2+b_2}{2}\right)$给出，因此也就是用矢量和$\frac{1}{2}(\alpha+\beta)$给出．所得到的矢量也可以称为矢量$\alpha$和$\beta$的重心．矢量代数的一组完整公设将在§7.3中给出，我们先描述矢量的其他一些例子．

习　题

1. 利用法则(1)和(2)证明矢量代数的定律(3)和(4)．
2. 画图说明分配律(4)．
3. 证明：全体平面矢量构成加法群．
4. 证明：每个平面矢量α可以唯一地表示成两个矢量之和$\alpha=\beta+\gamma$，其中β是沿x轴方向的矢量，γ是沿y轴方向的矢量．

§7.2　推　广

上节描述的例子可以在两个方面推广．第一个方面，维数

---

① 本书里我们用小写希腊字母，象$\alpha, \beta, \gamma, \cdots, \xi, \eta, \zeta, \cdots$来表示矢量，用小写拉丁字母来表示标量．

(§ 7.1 的矢量是二维的)可以是任意的. 首先,从以下事实我们看出维数可以推广. 按照 § 7.1 中处理平面位移和平面力的同样的方法可以处理空间中的位移和力, 唯一的差别是,对于空间的情形, 矢量具有三个分量(x_1, x_2, x_3),而平面矢量具有两个分量.

其次,在静力学理论中我们可以看出,作用在刚体上的力能够分解成六个分量: 作用在重心上沿三个互相垂直方向的拉力和绕这些垂直轴的三个旋转力矩. 两个力的合力的分量还可以通过各力的分量来计算,而数乘运算(用实数去乘)的含义同上面一样.

更一般地, 对任意正整数 n, 全体 n-数组 $\alpha=(a_1, \cdots, a_n)$ 构成一个 n 维矢量空间,可以把它看作 n 维几何空间. 例如,直线是形为 $\alpha+t\beta$(α, β 固定,$\beta\neq 0$; t 是变量)的元素的集合; $\alpha_1, \cdots, \alpha_m$ 的重心是$\frac{1}{m}(\alpha_1+\cdots+\alpha_m)$, 等等(这将在 § 9.13 中叙述). 为了得到完整的几何理论, 我们只须如在 § 7.10 中那样引进距离的概念.

第二方面的推广来源于下面的观察: 就涉及的代数性质而论,矢量的分量和标量都不一定是实数,而可以是任意域上的元素. 实际上,含有复分量的矢量在电路理论和电磁学中常常被用到. 而在第十四章中,我们是以研究含有有理标量的矢量作为代数数论的基础.

前面两段所描述的推广合并起来叙述就是, 对于任意正整数 n (维数)和任意标量域 F 推广都成立.

例 矢量空间 F^n 是以所有 n- 数组 $\alpha=(a_1, \cdots, a_n)$, $\beta=(b_1, \cdots, b_n)$, $\cdots$ (其中分量 a_i, b_i 在 F 中)作为它的元素. F^n 中的加法和数乘运算定义如下:

$$(a_1, \cdots, a_n)+(b_1, \cdots, b_n)=(a_1+b_1, \cdots, a_n+b_n), \tag{5}$$

$$c(a_1, \cdots, a_n)=(ca_1, \cdots, ca_n). \tag{6}$$

定理 1 *在矢量空间 $V=F^n$ 中, 矢量加法和数乘运算具有下*

列性质:

在加法运算之下 V 是阿贝耳群; (7)

$c(\alpha+\beta)=c\alpha+c\beta$, $(c+c')\alpha=c\alpha+c'\alpha$(分配律) (8)

$(cc')\alpha=c(c'a)$, $1\cdot\alpha=\alpha$. (9)

证明 我们首先验证关于群的公设. 矢量加法满足结合律, 这是因为对任意象上面那样定义的矢量 α 和 β, 和任意矢量 $\gamma=(c_1, \cdots, c_n)$, 我们有

$$(\alpha+\beta)+\gamma=(a_1+b_1+c_1, \cdots, a_n+b_n+c_n)=\alpha+(\beta+\gamma).$$

上式是根据域中加法的结合律(§ 6.4), 对每个 i, 有 $(a_i+b_i)+c_i=a_i+(b_i+c_i)$. 特殊矢量 $\mathbf{0}=(0, \cdots, 0)$ 起着单位元素的作用, 而 $-\alpha=(-a_1, \cdots, -a_n)$ 在 $\alpha+(-\alpha)=(-\alpha)+\alpha=\mathbf{0}$ 的意义下是 α 的逆元素. 注意, $-\alpha=(-1)\alpha$ 还是矢量 α 与标量 (-1) 的乘积, 而 $\mathbf{0}=0\alpha$, 对任意 α.

因为对每个 i 有 $a_i+b_i=b_i+a_i$, 所以上述群是可交换的. 同样地, 定义(5)和(6)将分配律(8)的两边化为分量所在域中的分配律.

习　题

1. 设 $\alpha=(1, 1, 0)$, $\beta=\left(-\frac{1}{2}, 0, \frac{2}{3}\right)$, $\gamma=\left(0, \frac{1}{4}, 2\right)$, 计算:

   (a) $\alpha+2\beta+3\gamma$,

   (b) $3(\alpha+\beta)-2(\beta+\gamma)$,

   (c) α, β, γ 的重心是什么?

   (d) 解方程 $6\beta+5\xi=\alpha$.

2. 设 $\alpha=(1, i, 0)$, $\beta=(0, 1-i, 2i)$, $\gamma=(1, 2-i, 1)$, 计算:

   (a) $2\alpha-i\beta$,

   (b) $i\alpha+(1+i)\beta-(i+3)\gamma$,

   (c) 解方程 $\alpha-i\xi=\beta$.

3. 设 α 和 β 如习题 1 和习题 2 所述，试把线段 $\overline{\alpha\beta}$ 分为 2:1.

*4. 设 α 和 β 如习题 2 所述，你能把线段 $\overline{\alpha\beta}$ 分为 $1:2i$ 吗？并加以说明.

5. 设 $\mathbf{Z}_3^n$ 是由 n 维矢量组成，其分量属于模 3 整数域. 试问

(a) $\mathbf{Z}_3^n$ 中有多少矢量？

(b) 关于 $\mathbf{Z}_3^n$ 中的 $\alpha+\alpha+\alpha$，你能说些什么？

*6. 你能够定义 $\mathbf{Z}_3^n$ 中任意两点间的“中点”吗？能定义任意三点（或四点）的重心吗？（提示：试验数值例子.）

§7.3 矢量空间与子空间

我们现在来定义矢量空间的一般概念. 矢量空间实质上就是一个代数系统，它的元素在矢量加法和数乘运算之下组合在一起，这里的数(标量)是属于一个适当的域 F，对于这两个运算，§7.2 中列举的法则都成立.

定义 域 F 上的矢量空间 V 是满足下面条件的矢量的集合：V 中任意两个矢量 α 和 β 确定一个(唯一的)矢量 $a+b$ 作为和；任意矢量 $\alpha\in V$ 和任意标量 $c\in F$ 确定一个“数乘”积，它具有性质(4)和(7)～(9).

(法则(8)和(9)对于所有矢量 α 和 β，以及所有标量 c 和 c' 都成立.)

定理 1 实质上表明，对任意正整数 n 和任意域 F，F^n 是矢量空间. 还有很多无穷维矢量空间，它们在现代数学分析中起着基本的作用.

例如，设 S 表示所有实变量 x 的函数 $f(x)$ 的集合，$f(x)$ 在区间 $0\leqslant x\leqslant 1$ 上单值连续. 两个这样的函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 的和 $h(x)=f(x)+g(x)$ 是 S 中的一个函数，并且 $f(x)$ 与实常数 c 的“数乘”积 $cf(x)$ 也是一个这样的函数. 这些函数不可能用箭头表示，但是，它们的加法和数乘运算具有同我们前述例子同样形式的代数性质. 甚至可以认为，这个集合 S 中的矢量在线段 $0\leqslant x\leqslant 1$ 的每

一点上有一个分量(即函数值!).

再有，考虑函数 f，它的定义域是任意集合 S (比如说，任意平面区域)，它的取值域是域 F，这就是说，f 赋给每个 $x\in S$ 一个值 $f(x)\in F$. 如果和 $h=f+g$ 及“数乘”积 $h'=cf$ 是用方程 $h(x)=f(x)+g(x)$ 及 $h'(x)=cf(x)$ 对每个 $x\in S$ 分别定义的，那么所有这样函数 f 的集合构成 F 上的矢量空间.

为了与我们所用的群的加法记号相一致，我们用 $\mathbf{0}$ 表示这个群的单位元素，它是满足

$$\alpha+\mathbf{0}=\mathbf{0}+\alpha=\alpha,\ \text{对一切}\ \alpha \tag{10}$$

的唯一的“零”矢量. 零矢量 $\mathbf{0}$ 与零标量 0 不应被混淆. 然而，它们两个却都是单位元素.

事实上，对所有的 c 和 α，由(8)的两个分配律得到

$$c\alpha+0\alpha=(c+0)\alpha=c\alpha=c\alpha+\mathbf{0},$$

$$c\alpha+c\mathbf{0}=c(\alpha+\mathbf{0})=c\alpha=c\alpha+0.$$

现在消去两边的 $c\alpha$，我们得到两个公式

$$0\alpha=\mathbf{0},\ \text{对一切}\ \alpha;\qquad c\mathbf{0}=\mathbf{0},\ \text{对一切}\ c. \tag{11}$$

再有，“数乘”积 $(-1)\alpha$ 在群中充当任意给定矢量 α 的逆元素，这因为

$$\alpha+(-1)\alpha=1\cdot\alpha+(-1)\alpha=[1+(-1)]\alpha=0\alpha=\mathbf{0}.$$

因此

$$\text{在(加法)群中，任意矢量}\ \alpha\ \text{的逆矢量是}\ (-1)\alpha. \tag{12}$$

由(11)和(12)得出，任意矢量的“幂”的循环子群是由不同整数 n 和 α 的乘积组成.

在普通的三维矢量空间 $\mathbf{R}^3$ 中，位于一个固定平面上通过原点的所有矢量构成一个二维矢量空间，它是整个空间的一部分. 类似地，位于一个固定直线上通过原点的所有矢量的集合 S，在加法和数乘运算之下是封闭的，因此这个集合也是 $\mathbf{R}^3$ 的“子空间”.

定义 矢量空间V的子集合S，如果它对于V中的矢量加法和数乘运算也是一矢量空间，那么S称为V的子空间.

一个非空子集S是子空间当且仅当S中任意两个矢量之和还在S中，并且S的任意矢量与标量的乘积还在S中. 从定义出发可以很容易地验证这个命题. 很显然，子空间的定义同以前子域和子群的定义相类似. 从几何上讲，"子空间"只不过是通过原点O的线性子空间(直线，平面等等).

例如，对任何域F，形为$(0, x_2, 0, x_4)$的全体矢量构成F^4的子空间. 还有，单独一个零矢量$\mathbf{0}$是任意矢量空间的子空间.

再有，次数最高是7的多项式集合是所有多项式构成的矢量空间的子空间，这里不管多项式的基域是否是实数域. 类似地，定义在区间$0\leqslant x\leqslant 1$上的全体连续函数的集合是定义在同一个定义域上所有函数的线性空间的子空间.

在矢量空间V中，给定矢量$\alpha_1, \cdots, \alpha_m$，所有$\alpha_i$的线性组合

$$c_1\alpha_1+\cdots+c_m\alpha_m \qquad (\text{每个 } c_i \text{ 是标量})$$

的集合是子空间，这是因为对所有矢量α_i和所有标量c_i，c_i'及c'，恒等式

$$\begin{aligned}(c_1\alpha_1+\cdots+c_m\alpha_m)+(c_1'\alpha_1+\cdots+c_m'\alpha_m) \\ =(c_1+c_1')\alpha_1+\cdots+(c_m+c_m')\alpha_m,\end{aligned} \tag{13}$$

$$c'(c_1\alpha_1+\cdots+c_m\alpha_m)=(c'c_1)\alpha_1+\cdots+(c'c_m)\alpha_m, \tag{14}$$

都成立. 这就证明了

定理2 矢量空间V中任意一组矢量的所有线性组合的集合是V的子空间.

这个子空间显然是包含所有给定矢量的最小子空间，因此称它为由给定矢量生成(或张成)的子空间. 由单个矢量$\alpha_1\neq\mathbf{0}$张成的子空间是所有"数乘"积$c\alpha_1$组成的集合S_1；在几何上，S_1就是通过原点和α_1的直线. 类似地，由两个非共线的矢量α_1和α_2张

成的子空间实际上是一个通过 α_1, α_2 和原点的平面.

定理 3 矢量空间 V 的任意两个子空间的交 $S\cap T$ 是 V 的子空间.

证明 两个给定的子空间 S 和 T 的交，定义为既属于 S 又属于 T 的所有矢量的集合 $S\cap T$(参见 § 6.9 定理 17，关于两个子群的交). 如果 α 和 β 是两个这样的矢量，则它们的和 $\alpha+\beta$ 一定在 S 中(因为 S 是包含 α 和 β 的子空间)，同样也一定在 T 中，因此它也在交 $S\cap T$ 中. 类似地，任意矢量 α 的"数乘"积 $c\alpha$ 在 $S\cap T$ 中.

证毕

再有，矢量空间 V 的任意两个子空间 S 和 T 确定一个集合 $S+T$，它是由所有和 $\alpha+\beta$ 组成，其中 α 属于 S，β 属于 T. 根据交换律，结合律和分配律(3)和(4)，集合 $S+T$ 是个子空间，称为 S 和 T 的线性和或线性张成. 显然，它包含 S 和 T，而其他任意同时包含 S 和 T 的子空间 R 都包含它. 因此线性和的概念类似于两个子群的并(参见 § 6.8). $S+T$ 的这些性质可以叙述为

$$S\subset S+T, \quad T\subset S+T; \tag{15}$$

$$\text{由 } S\subset R \text{ 和 } T\subset R, \text{ 推出 } S+T\subset R,$$

这里 $S\subset R$ 的意思是子空间 S 包含在子空间 R 中.

习　题

1. 证明：在任何矢量空间中，由 $c\alpha=\mathbf{0}$ 可推出或者 $c=0$，或者 $\alpha=\mathbf{0}$.

2. 设 α, β, γ 如 § 7.2 习题 1 中所述，计算

$$7\left[2(\alpha-3\beta)+\frac{1}{3}(3\beta-6\gamma)\right]-2(\alpha-\gamma)+5\beta+2\alpha.$$

3. 设 α, β 如 § 7.2 习题 2 中所述，计算 $(1+2i)(2\alpha-3\beta)-8\alpha-9i\beta$.

4. 下列 $\mathbf{Q}^n(n\geqslant 2)$ 的子集合中，哪些组成子空间（这里 ξ 表示矢量 $(x_1, \cdots, x_n)$）？

(a) 分量 x_1 为整数的所有 ξ;

(b) 分量 $x_2=0$ 的所有 ξ;

(c) 或者分量 $x_1=0$ 或者分量 $x_2=0$ 的所有 ξ;

(d) 满足条件 $3x_1+4x_2=1$ 的所有 ξ;

(e) 满足条件 $7x_1-x_2=0$ 的所有 ξ.

5. 下列定义在 $0\leqslant x\leqslant 1$ 上的实函数 $f(x)$ 的集合中，哪些是 $0\leqslant x\leqslant 1$ 上所有实函数矢量空间的子空间:

(a) 所有四次多项式;

(b) 所有四次或低于四次的多项式(包括 $f(x)=0$);

(c) 满足条件 $2f(0)=f(1)$ 的所有函数;

(d) 满足条件 $0+f(1)=f(0)+1$ 的所有函数;

(e) 所有正函数;

(f) 对一切 x 满足 $f(x)=f(1-x)$ 的所有函数.

6. 当 D 取作域 F 时, § 3.3 习题 3 所描述的函数集合中，哪些构成矢量空间?

7. 设 S 是 $\mathbf{Q}^3$ 的子空间，它是由所有形为 $(0, x_2, x_3)$ 的矢量组成，而 T 是由矢量 $(1, 2, 0)$ 和 $(3, 1, 2)$ 张成的子空间. 哪些矢量在 $S\cap T$ 中? 哪些矢量在 $S+T$ 中?

8. 在 $\mathbf{Z}_3^3$ 中，有多少矢量是由 $(1, 2, 1)$ 和 $(2, 1, 1)$ 张成的? 有多少矢量是由 $(1, 2, 1)$ 和 $(2, 1, 2)$ 张成的?

9. 证明: 在 $\mathbf{Q}^3$ 中，平面 $x_3=0$ 可以由下面每对矢量张成: $(1, 0, 0)$ 和 $(1, 1, 0)$; $(2, 2, 0)$ 和 $(4, 1, 0)$; $(3, 2, 0)$ 和 $(-3, 2, 0)$.

10. 证明: 如果 S 是由 ξ_1 和 ξ_2 张成，T 是由 η_1, η_2 和 η_3 张成，那么 $S+T$ 是由 $\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2$ 和 η_3 张成. 推广这个结果.

11. 构造 $\mathbf{Z}_2^2$ 的加法表，并列出它的子空间.

12. 构造 $\mathbf{Z}_2^3$ 的加法表，并列出它的子空间.

13. 证明: 一对齐次线性方程 $a_1x_1+\cdots+a_nx_n=0$, $b_1x_1+\cdots+b_nx_n=0$ (其中 a_i, b_i, x_i 全都属于 F) 的所有解 $(x_1, \cdots, x_n)$ 的集合是 F^n 的子空间.

*14. 证明: 矢量空间公设 $1\cdot\alpha=\alpha$ 不能从其他公设推出. (提示: 在平面上构造“伪”数乘积 $c\otimes\alpha$, 它是 $c\alpha$ 在固定直线上的投影.)

*15. 证明: 对于矢量加法的交换律公设是多余的. (提示: 用两种方法展开 $(1+1)(\alpha+\beta)$.)

§7.4 线性无关与维数

矢量空间或者子空间的维数这一重要几何概念尚待给出抽象的定义. 它将被描述为张成这个空间(或子空间)的矢量的最少个数.

例如, 普通空间 $\mathbf{R}^3$ 可以由三个矢量(1,0,0), (0,1,0)和(0,0,1)张成, 它们分别是沿三个坐标轴的单位矢量(长度为 1), 但是 $\mathbf{R}^3$ 不能由两个矢量张成(两个非共线矢量张成一个通过原点的平面). 因此$\mathbf{R}^3$的维数是3.

更一般地, 任意F^n 由 n 个单位矢量

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= (1, 0, \cdots, 0), \\ \varepsilon_2 &= (0, 1, \cdots, 0), \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \varepsilon_n &= (0, 0, \cdots, 1) \end{aligned} \tag{16}$$

张成. 实际上, F^n中任意矢量是这些单位矢量的线性组合, 这因为

$$(x_1, \cdots, x_n) = x_1\varepsilon_1 + \cdots + x_n\varepsilon_n. \tag{17}$$

我们将在定理 5 的推论 2 中证明, F^n不能由少于 n 个矢量张成, 因此有理由称 F^n 为域F 上的 n 维矢量空间.

不仅 $\varepsilon_1, \cdots, \varepsilon_n$生成整个空间 F^n, 而且, $x_1\varepsilon_1 + \cdots + x_n\varepsilon_n = \mathbf{0}$ 当且仅当$(x_1, \cdots, x_n) = (0, \cdots, 0)$, 即当且仅当 $x_1 = \cdots = x_n = 0$. 这意味着单位矢量在下述意义之下是线性无关的.

定义 矢量 $\alpha_1, \cdots, \alpha_m$ 线性无关(在 F 上)当且仅当对 F 中一切标量 c_i,

$$\text{由 } c_1\alpha_1 + \cdots + c_m\alpha_m = \mathbf{0} \text{ 推出 } c_1 = \cdots = c_m = 0. \tag{18}$$

一组矢量如果不是线性无关的, 则称它们线性相关.

线性无关的矢量组的任意子集合还是线性无关的, 这是定义

的明显的结论. 然而，下面关于线性组合与线性相关之间的关系更为重要.

定理 4 在空间V中非零矢量$\alpha_1,\cdots,\alpha_m$线性相关当且仅当这些矢量中的某个矢量是它前面几个矢量的线性组合.

证明 在矢量α_k是它前面几个矢量的线性组合$\alpha_k=c_1\alpha_1+\cdots+c_{k-1}\alpha_{k-1}$的情况下，我们立刻有一个线性关系

$$c_1\alpha_1+\cdots+c_{k-1}\alpha_{k-1}+(-1)\alpha_k=\mathbf{0},$$

其中至少有一个系数(-1)不为零. 因此根据(18)，这些矢量线性相关.

反之，假定矢量$\alpha_1,\cdots,\alpha_m$线性相关，于是$d_1\alpha_1+\cdots+d_m\alpha_m=\mathbf{0}$，选取最大的下标$k$，使得$d_k\neq0$，然后把$\alpha_k$表示成线性组合

$$\alpha_k=(-d_k^{-1}d_1)\alpha_1+\cdots+(-d_k^{-1}d_{k-1})\alpha_{k-1},$$

除了$k=1$的情形之外，上式将α_k表为它前面几个矢量的线性组合. 在$d_1\alpha_1=\mathbf{0}$(其中$d_1\neq0$)的情形中，故有$\alpha_1=\mathbf{0}$，这同我们给定的矢量没有一个为零矢量的假定矛盾.

例如，三个矢量$\beta_1=(2,0,0)$，$\beta_2=(1,3,0)$和$\beta_3=(0,-2,0)$不能张成整个空间$\mathbf{R}^3$，因为它们位于同一个平面上. 我们可以用关系$\beta_1-2\beta_2-3\beta_3=\mathbf{0}$或者(解出$\beta_1$)用关系$\beta_1=2\beta_2+3\beta_3$来表示这个线性相关. 于是集合$(\beta_1,\beta_2,\beta_3)$同它的一个真子集$(\beta_2,\beta_3)$张成同一个子空间. 这就证明了

推论 1 一组矢量线性相关当且仅当它包含一个真(即最小)子集与原矢量组张成同一个子空间.

这也就是说，我们可以从这组矢量中，删去任意一个矢量，它是$\mathbf{0}$或者它是它前面矢量的线性组合，并可证明剩下来的矢量生成的子空间与原来一组矢量生成的子空间相同. 现在用归纳法，我们得到

推论 2 任意有限的矢量集合包含一个线性无关的子集合，

它张成的子空间与原集合张成的子空间相同.

现在我们可以叙述线性相关的基本定理.

定理5 设 n 个矢量张成矢量空间 V, 它包含 r 个线性无关矢量, 那么 $n \geqslant r$.

证明 设 $A_0=[\alpha_1, \cdots, \alpha_n]$是张成 V 的 n 个矢量的序列, 并设 $X=[\xi_1, \cdots, \xi_r]$是 V 的 r 个线性无关矢量的序列. 因为 A_0 张成 V, 所以 ξ_1 是 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 的线性组合, 因此序列 $B_1=[\xi_1, \alpha_1, \cdots, \alpha_n]$ 张成 V, 而且是线性相关的. 根据定理 4, B_1 的某一个矢量必与它前面的矢量线性相关. 这个矢量不可能是 ξ_1, 因为 ξ_1 属于线性无关矢量组 X, 因此在 B_1 中, 某个矢量 α_i 依赖于它前面的矢量 $\xi_1, \alpha_1, \cdots, \alpha_{i-1}$. 象推论 1 那样, 删去这个矢量 α_i, 子序列 $A_1=[\xi_1, \alpha_1, \cdots, \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \cdots, \alpha_n]$仍然张成 V.

现在重复论证. 构造序列 $B_2=[\xi_2, A_1]=[\xi_2, \xi_1, \alpha_1, \cdots, \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \cdots, \alpha_n]$, 同 B_1 一样, B_2 张成 V, 而且它是线性相关的. 因此和前面一样, B_2 中某一个矢量是它前面矢量的线性组合. 因为这些 ξ_i 是线性无关的, 所以这个矢量不会是 ξ_2 或 ξ_1, 故一定是某个 α_j, 其中下标 $j \neq i$(比如说, $j>i$). 删去这个 α_j, 剩下可张成 V 的 n 个矢量的新序列

$$A_2=[\xi_2, \xi_1, \alpha_1, \cdots, \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \cdots, \alpha_{j-1}, \alpha_{j+1}, \cdots, \alpha_n]$$

这一论证可以重复 r 次, 直到 X 的元素都取完. 每一次失去 A_0 的一个元素. 因此 A_0 最初就一定至少包含 r 个元素, 这就证明了 $n \geqslant r$. 证毕

定理 5 有几个重要推论. 虽然它们包含的"基底"和"维数"等概念的完整涵义直到 § 7.8 才变得显然, 然而为方便起见, 我们现在还是证明这些推论.

定义 生成(张成)整个矢量空间的一组线性无关矢量称为这个矢量空间的基底. 一个矢量空间是有限维的当且仅当它有一组

有限基底.

例如,(16)式的单位矢量 $\varepsilon_1, \cdots, \varepsilon_n$ 是 F^n 的一组基底.

推论1 任意有限维矢量空间 V 的一切基底都包含着相同数目(有限个)的元素.

证明 因为 V 是有限维的,所以它有一组有限基底

$$A=[\alpha_1, \cdots, \alpha_n],$$

设 B 是 V 的任意另一组基底. 因为 A 张成 V, 并且 B 是线性无关的, 定理5表明 B 是有限的,比如说有 r 个元素,于是 $n \geqslant r$. 另一方面, B 张成 V,而 A 是线性无关的,因此 $r \geqslant n$, 所以 $n=r$.

有限维矢量空间 V 的任意一组基底中元素的个数称为 V 的维数,并用 $d[V]$ 表示. 根据定理5我们有

推论2 如果矢量空间 V 的维数是 n, 那么,(i) V 的任意 $n+1$ 个元素是线性相关的;(ii) $n-1$ 个元素的任意集合不可能张成 V.

定理6 有限维矢量空间 V 的任意一组线性无关矢量是 V 的基底的一部分.

证明 设这个线性无关矢量组是 $\xi_1, \cdots, \xi_r$, 并设 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 是 V 的一组基底. 构成序列 $C=[\xi_1, \cdots, \xi_r, \alpha_1, \cdots, \alpha_n]$. 我们从 C 中可以抽出一个线性无关的子序列(定理4的推论2), 它也张成空间 V(因而它是 V 的一组基底), 这个子序列是通过删去那些是它前面矢量的线性组合的矢量而得到的. 因为这些 ξ_i 是线性无关的, 所以没有一个 ξ_i 被删去, 因此所得到的这组基底包含每一个 ξ_i.

推论 n 维矢量空间 V 的 n 个矢量 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 是一组基底的充分条件是:或者它们张成空间 V,或者它们线性无关.

证明 如果 $A=[\alpha_1, \cdots, \alpha_n]$ 张成 V, 则它包含一个子集合 A', 这个 A' 是 V 的一组基底(定理4的推论2); 因为 V 的维数是 n, 所以 A' 必有 n 个元素(定理5的推论1),因此 $A'=A$, 于是 A 是 V

的一组基底. 再有，如果 A 是线性无关的，那么根据定理 6, A 是基底的一部分，根据定理 5 的推论 1，这组基底应有 n 个元素，所以 A 本身就一定是一组基底.

习　题

1. 证明：在 F^2 中，矢量 (a_1, a_2) 和 (b_1, b_2) 线性相关当且仅当 $a_1b_2-a_2b_1=0$.

2. 矢量 $(1, 1, 0)$ 和 $(0, 1, 1)$ 构成 $\mathbf{Q}^3$ 的一组基底吗？为什么？

3. 证明：如果 β 不在子空间 S 中，而在由 S 和 α 张成的子空间中，那么 α 在由 S 和 β 张成的子空间中.

4. 证明：如果 ξ_1, ξ_2, ξ_3 在 $\mathbf{R}^n$ 中线性无关，那么 $\xi_1+\xi_2, \xi_1+\xi_3, \xi_2+\xi_3$ 也线性无关. 这个结论在每个 F^n 中都正确吗？

5. 由 $\mathbf{Z}_3^7$ 中四个线性无关的元素张成的每个子空间中有多少个元素？推广你的结论.

6. 定义整环 D 上的矢量空间，在这个更一般的情形中，迄今所讨论的公设和定理中有哪些不能成立？

*7. 证明：具有有理坐标的三个矢量在 $\mathbf{Q}^3$ 中线性无关当且仅当它们在 $\mathbf{R}^3$ 中线性无关. 按两个方面推广这个结果.

8. 设矢量 $\alpha_1, \cdots, \alpha_m$ 线性无关，证明：矢量 β 是 $\alpha_1, \cdots, \alpha_m$ 的线性组合当且仅当矢量 $\alpha_1, \cdots, \alpha_m, \beta$ 线性相关.

*9. 证明：实数 $1, \sqrt{2}$ 和 $\sqrt{5}$ 在有理数域上线性无关.

10. 在 $\mathbf{C}^3$ 中找出四个矢量，它们一起张成二维子空间，并且它们之中任意两个矢量线性无关.

11. 证明：如果 $c_1\alpha+c_2\beta+c_3\gamma=\mathbf{0}$，其中 $c_1c_3\neq 0$，那么 α 和 β 生成的子空间与 β 和 γ 生成的子空间相同.

12. 证明：如果矢量空间 V 的两个子空间 S 和 T 具有相同的维数，那么由 $S\subset T$ 可推出 $S=T$.

*13. (a) $\mathbf{Z}_2^3$ 中有多少两元素的线性无关组？有多少三元素的线性无关组？有多少四元素的线性无关组？

(b) 把你的公式推广到 $\mathbf{Z}_2^n$ 上和 $\mathbf{Z}_p^n$ 上.

*14. $\mathbf{Z}_p^n$ 有多少不同的 k 维子空间.

§7.5 矩阵与行等价

与F^n中含有数值坐标的矢量集合有关的问题,差不多总可以描述为联立线性方程组问题. 这样,它们常常可以用§2.3中叙述的消去法求解. 我们现在就开始系统地研究这个方法,这个方法是以矩阵及其行等价等基本概念为中心的. 我们首先给出矩阵的定义.

定义 在域F上,m行和n列元素组成的长方阵列称为F上的$m\times n$矩阵.

注 显然,任意域F上的全体$m\times n$矩阵在下述两种运算之下构成mn维矢量空间: (i)用同一个标量c去乘矩阵的所有元素; (ii)两矩阵各对应分量相加.

我们现在运用矩阵的概念来确定,在什么情况下F^n的两组矢量$\alpha_1,\cdots,\alpha_m$和$\beta_1,\cdots,\beta_r$张成同一个子空间. 显然,矢量$\alpha_1,\cdots,\alpha_m$确定一个$m\times n$矩阵

$$A=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \tag{19}$$

它的第i行由矢量α_i的n个分量$a_{i1},\cdots,a_{in}$组成. 矩阵(19)可以缩写为(a_{ij}). 矩阵A的每一行看作F^n的矢量,称为行矢量,由全体行矢量张成的F^n的子空间称为矩阵A的*行空间*. 我们现在要问: 什么时候两个$m\times n$矩阵有相同的行空间呢? 也就是说,什么时候它们的行矢量在F^n中张成相同的子空间呢? 这个问题的部分答案是通过我们现在要定义的行等价的概念给出的.

我们现在考虑下列称为*初等行运算*的三个典型步骤作用在(19)式矩阵A时的效果:

(i) 任意两行互换.

(ii) 某一行元素乘以 F 中任意非零常数 c.

(iii) 某一行的任意倍数加到其他任意一行上.

如果 $m\times n$ 矩阵 B 可以从 $m\times n$ 矩阵 A 通过有限次初等行运算得到，那么称 B 与 A 行等价. 因为每一个这样的运算的效果可以通过另一个同类型运算抵消，使矩阵不变，因此我们有下面引理.

引理 *任何初等行运算的逆仍是初等行运算.*

因此，如果 B 行等价于 A，那么 A 行等价于 B，也就是说，行等价关系是对称的. 显然还具有自反性和传递性，因此它是一个等价关系.

定理 7 *行等价矩阵具有相同的行空间.*

证明 用 $\alpha_1, \cdots, \alpha_m$ 表示 $m\times n$ 矩阵 A 的逐个行矢量. 那么 A 的行空间是所有形为 $c_1\alpha_1+\cdots+c_m\alpha_m$ 的矢量组成的集合，并且初等行运算变为

(i) α_i 与 α_j 互换 $(i\neq j)$.

(ii) 对任意标量 $c\neq 0$，用 $c\alpha_i$ 代替 α_i.

(iii) 对任意 $j\neq i$ 和任意标量 d，用 $\alpha_i+d\alpha_j$ 代替 α_i.

只须考虑每种类型单个初等行运算作用在行空间上的效果. 因为类型 (i) 和 (ii) 的运算显然不改变行空间，所以我们只注意类型 (iii) 的单个初等行运算的情形. 取一个典型的情况，即把第二行的倍数加到第一行上，这就是把 A 的各行矢量分别用行等价矩阵 B 的各新行矢量

$$\beta_1=\alpha_1+d\alpha_2,\ \beta_2=\alpha_2,\ \cdots,\ \beta_m=\alpha_m \tag{20}$$

来代替. B 的行空间的任意矢量 γ 具有形式 $\gamma=\sum c_i\beta_j$，因此把 (20) 代入，我们有

$$\gamma=c_1(\alpha_1+d\alpha_2)+c_2\alpha_2+\cdots+c_m\alpha_m,$$

这表明 γ 在 A 的行空间中. 反过来，根据引理，A 的行矢量可以通

过B的行矢量表示为

$$\alpha_1=\beta_1-d\beta_2, \alpha_2=\beta_2, \cdots, \alpha_m=\beta_m,$$

所以同样的论证指出A的行空间包含在B的行空间中，于是两个行空间相等.

上述证明立即得到

推论1 把矩阵A化为行等价矩阵B的任意一系列初等行运算可以明显地把B的行矢量表示为A的行矢量的线性组合.

联立线性方程组 下面我们应用行等价矩阵的概念重新说明一下§2.3所描述的“高斯消去法”. 考虑联立线性方程组

$$\begin{aligned} &a_{11}x_1+a_{12}x_2+\cdots+a_{1n}x_n=a_{1,n+1},\\ &a_{21}x_1+a_{22}x_2+\cdots+a_{2n}x_n=a_{2,n+1},\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ &a_{m1}x_1+a_{m2}x_2+\cdots+a_{mn}x_n=a_{m,n+1}, \end{aligned} \tag{21}$$

这里系数a_{ij}是域F中已知常数，我们想要知道什么样的解矢量$\xi=(x_1, x_2, \cdots, x_n)$(如果存在的话)满足已知方程组(21).

容易验证，满足(21)的一组解矢量ξ在下列各种运算之下是不变的:

(i) 任意两个方程互换.

(ii) 一个方程乘上F中任意非零常数c.

(iii) 一个方程的任意倍数加到其他任意一个方程上.

但是这些运算应用到(21)中的$m\times(n+1)$常数矩阵(a_{ij})时，它们恰是前面定义过的三种初等行运算. 这就证明了

推论2 如果A和B是同一个域F上的$m\times(n+1)$行等价矩阵，那么联立线性方程组(21)同方程组

$$\begin{aligned} &b_{11}x_1+b_{12}x_2+\cdots+b_{1n}x_n=b_{1,n+1},\\ &b_{21}x_1+b_{22}x_2+\cdots+b_{2n}x_n=b_{2,n+1},\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ &b_{m1}x_1+b_{m2}x_2+\cdots+b_{mn}x_n=b_{m,n+1} \end{aligned} \tag{21'}$$

有相同解矢量 $\xi=(x_1, \cdots, x_n)$ 集合.

习 题

1. 设 A 和 B 是行等价矩阵, 证明: A 的行矢量线性无关当且仅当 B 的行矢量线性无关.

2. 证明: 如果运算(iii)用下面(iii′)来代替, 那么行等价的涵义不变.

   (iii′) 任意一行加到其他任意一行.

*3. 证明: 任意(i)类初等行运算可以用四次(ii)、(iii)类运算来完成. (提示: 用 2×2 矩阵试验.)

§7.6 线性相关的检验

现在我们的目的在于使用初等行运算把已知的 $m\times n$ 矩阵 A 尽可能简化. 在 A 的任意非零的行中, 第一个非零元素称为这一行的"首"元素. 如果矩阵 A 满足下列两个条件, 则我们称 A 是行简化矩阵:

(a) 每个首元素(非零行的)是 1.

(b) 包含这样的首元素的每列中, 其他元素都是零.

4×6 行简化矩阵的例子是

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & r_{14} & r_{15} & r_{16} \\ 1 & 0 & 0 & r_{24} & r_{25} & r_{26} \\ 0 & 1 & 0 & r_{34} & r_{35} & r_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & d_{12} & 0 & d_{14} & 0 & d_{16} \\ 0 & 0 & 1 & d_{24} & 0 & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & d_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

定理 8 任意矩阵 A, 可通过(ii)类和(iii)类初等行运算使它行等价于行简化矩阵.

证明 假设含有元素 a_{ij} 的已知矩阵 A, 它的第一行非零, 其首元素是 a_{1t}, 位于第 t 列. 用 a_{1t}^{-1} 乘第一行, 这行的首元素变为 1. 现在对每个 $i\neq1$, 从第 i 行减去第一行的 a_{it} 倍. 这就把第 t 列的其他每个元素化为零, 因此对于第一行, 条件(a)和(b)满足.

现在按照同样的方式逐次处理其他各行. 在处理第 k 行时, 含有第 $1, \cdots, k-1$ 各行首元素的列中的元素不变, 这是因为这些列和第 k 行交叉的元素都已变为零. 因此当处理完第 k 行之后, 我们得到的矩阵其前 k 行满足条件(a)和(b). 对 k 用归纳法就推出定理 8.

通过行的置换(即相继进行(i)类初等行运算), 显然我们可以重新排列行简化矩阵 R 的各行, 使得

(c) R 的每个零行都排在 R 的所有非零行的下面.

假定有 r 个非零行, 对于 $i=1, 2, \cdots, r$, 第 i 行首元素出现在 t_i 列. 因为所有这样的列中其他元素都为零, 所以当 $i \neq j$ 时我们有 $t_i \neq t_j$. 再通过行的置换, 我们可重新排列 R 使得

(d) $t_1 < t_2 < \cdots < t_r$ (第 i 行首元素在第 t_i 列中).

如果行简化矩阵还满足(c)和(d), 则称为(行)简化梯形矩阵(首元素位于"梯"上). 我们已证明了

推论 任意矩阵同简化梯形矩阵行等价.

例如, (22)式的第二个矩阵已经是简化梯形矩阵; (22)式的第一个矩阵却不是, 但是, 把第一行放在第三行下面就可化成简化梯形矩阵.

定理 9 设 E 是含有非零行 $\gamma_1, \cdots, \gamma_r$ 的行简化矩阵, 各行首元素 1 位于第 $t_1, \cdots, t_r$ 列. 那么对 E 的行空间中的任意矢量 β 有

$$\beta = y_1\gamma_1 + \cdots + y_r\gamma_r,$$

其中 γ_i 的系数 y_i 是 β 的第 t_i 列的元素, 也就是 β 的第 t_i 个分量.

证明 因为 E 的第 t_i 列元素除了 γ_i 行那个元素是 1 外, 其余都是 0, 所以 β 的第 t_i 个分量一定是 $y_i \cdot 1$.

推论 1 行简化矩阵的全体非零行矢量线性无关.

这是因为如果 $\beta=0$, 则根据上述定理每个 $y_i=0$.

推论 2 设 $m \times n$ 矩阵 A 与行简化矩阵 R 行等价，那么 R 的全体非零行矢量构成 A 的行空间的一组基底.

证明 根据推论 1, R 的这些行矢量线性无关，并张成 R 的行空间. 于是它们是这个行空间的一组基底，根据定理 7, R 的行空间与 A 的行空间恒等. 证毕

矩阵 A 的行空间的维数称为矩阵 A 的秩，记作 $\mathrm{rank}(A)$. 因为这个空间是由 A 的全体行矢量张成，这些行矢量一定包含张成行空间的一组线性无关的行矢量，所以我们看到，A 的秩也可被描述成 A 的线性无关行矢量的最大数目. 根据定理 7, 行等价矩阵具有相同的秩.

特别是，$n \times n$ 矩阵(方阵) A 的秩为 n 当且仅当它的所有行矢量线性无关. 主对角线(从左上方到右下方)上的元素都为 1，而其他元素都为 0 的 $n \times n$ 矩阵称为 $n \times n$ 单位矩阵，记作 I_n.

推论 3 一个 $n \times n$ 矩阵的秩为 n 当且仅当它与 $n \times n$ 单位矩阵 I_n 行等价.

证明 设 A 与秩为 n 的简化梯形矩阵 E 行等价，则矩阵 E 有 n 个非零行矢量，因此 n 个首元素 1 在 n 个不同的列中，在这些列中除了首元素外没有其他非零元素 (这些列包括所有的列). 适当调整行序，则 E 恰好是单位矩阵. 证毕

在检验矢量线性无关时，或更一般地，在计算子空间的维数(等于矩阵的秩)时，不一定使用简化梯形矩阵，只须把矩阵化为任意梯形矩阵就可以了，例如下面的 4×7 矩阵的形式

$$E=\begin{pmatrix} 0 & 1 & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} & d_{17} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & d_{25} & d_{26} & d_{27} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & d_{36} & d_{37} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

于是梯形矩阵可以通过下面条件来定义：每一非零行的首元素是

1，第一行后的每一行中，首元素 1 前零的个数大于前面那些行首元素前零的个数.

这样，化成梯形矩阵之后，利用下面的定理可直接求出矩阵的秩.

定理 10 任意矩阵 A 的秩是任意行等价于 A 的梯形矩阵的非零行的个数.

证明将留作习题.

例 检验 $\alpha_1=(1,-1,1,3)$，$\alpha_2=(2,-5,3,10)$ 和 $\alpha_3=(3,3,1,1)$ 的线性无关性.

通过(iii)类初等行运算得到新的行矢量 $\beta_1=\alpha_1$，$\beta_2=\alpha_2-2\alpha_1=(0,-3,1,4)$，$\beta_3=\alpha_3-3\alpha_1=(0,6,-2,-8)$. 最后，设 $\gamma_1=\beta_1$，$\gamma_2=-\frac{1}{3}\beta_2$，$\gamma_3=\beta_3-6\gamma_2=\beta_3+2\beta_2=\mathbf{0}$. 结果得到含有行矢量 γ_1，γ_2，γ_3 的梯形矩阵 C，

$$C=\begin{pmatrix}1 & -1 & 1 & 3\\ 0 & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{4}{3}\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}.$$

因为 C 有零行，所以原来的矢量 $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ 线性相关. 把前面的关系代入 $\gamma_3=\mathbf{0}$ 中，我们得出 α_i 之间明显的依赖关系

$$\mathbf{0}=\gamma_3=\beta_3+2\beta_2=(\alpha_3-3\alpha_1)+2(\alpha_2-2\alpha_1)=-7\alpha_1+2\alpha_2+\alpha_3.$$

行等价的附录 简化梯形矩阵为行等价性的检验提供了方便的方法.

定理 11 只存在一个 $m\times n$ 简化梯形矩阵 E 具有已知行空间 $S\subset F^n$.

证明 设具有行空间 S 的简化梯形矩阵 E 有非零行矢量 γ_1，$\cdots$，γ_r，这里 γ_i 的首元素是 1，位于第 t_i 列中. 由条件(d)，有 $t_1<t_2$

$<\cdots<t_r$. 设 $\beta=y_1\gamma_1+\cdots+y_r\gamma_r$ 是 E 的行空间中任意非零矢量；根据定理 9, 矢量 β 的第 t_i 个分量为 y_i，如果 y_s 是 y_1, …, y_r 中第一个非零元素，那么 $\beta=y_s\gamma_s+\cdots+y_r\gamma_r$. 因为 $t_s<\cdots<t_r$，所以剩下行矢量 $\gamma_{s+1}, \cdots$，γ_r 的首元素在第 t_s 列后面的那些列中，因此 β 有 y_s 作为它的首元素，位于第 t_s 列中. 换句话说，S 中的每个矢量 β 具有首元素位于第 $t_1,\cdots,t_r$ 列中的一列. 这些列的每一列都出现(γ_i 的首元素所在的列). 因此行空间 S 确定了指标 $t_1, \cdots$, t_r.

E 的行矢量 $\gamma_1, \cdots, \gamma_r$ 中, 每一行都有首元素 1, 在第 $t_1, \cdots, t_r$ 列中(对某一行而言)，除一列外其余各列都是零元素. 如果 β 是 S 的任意矢量, 它的首元素 1 在某一列(第 t_i 列)中，其他各列(第 t_j 列)的元素为零, 那么根据定理 9，β 一定是 γ_i. 于是行空间和这些列指标唯一确定了 E 的行矢量 $\gamma_1, \cdots, \gamma_r$. 满足定理要求.

证毕

推论 1 任意 $m\times n$ 矩阵 A 与一个且仅与一个简化梯形矩阵行等价.

这个结果容易证明. 它还可以概括为如下说法：简化梯形矩阵给出行等价意义下的矩阵标准型. 也就是说，每个矩阵与一个且仅与一个特殊的标准型矩阵行等价.

推论 2 两个 $m\times n$ 矩阵 A 和 B 行等价当且仅当它们有同一个行空间.

证明 如果 A 与 B 行等价, 那么根据定理 7，A 和 B 有同一个行空间. 反之, 如果 A 和 B 有同一个行空间, 它们分别行等价于简化梯形矩阵 E 和 E'. 因为 E 和 E' 有同一个行空间, 根据定理 11, E 和 E' 相等. 因此(通过 $E=E'$), A 确实与 B 行等价.

这些结果再次表明，矩阵的行等价恰是研究 F^n 子空间的另一种语言.

习　题

1. 证明：$\begin{pmatrix} 5 & 2 & 7 \\ -3 & 4 & 1 \\ -1 & -2 & -3 \end{pmatrix}$与$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$行等价.

2. 把下列各矩阵化为行等价的梯形矩阵：

(a) $\begin{pmatrix} 1 & -1 & 3 \\ 2 & -4 & 1 \\ 0 & 3 & 2 \end{pmatrix}$,　　(b) $\begin{pmatrix} -5 & 6 & -3 \\ 3 & 1 & 11 \\ 4 & -2 & 8 \end{pmatrix}$,

(c) $\begin{pmatrix} 1 & 6 & -2 & 5 \\ 4 & 0 & 4 & -2 \\ 7 & 2 & 0 & 2 \\ -6 & 3 & -3 & 3 \end{pmatrix}$,　　(d) $\begin{pmatrix} 2 & -1 & 3 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 4 \\ 4 & -2 & 3 & 9 \\ 2 & -3 & 4 & 5 \end{pmatrix}$,

(e) $\begin{pmatrix} i & 1 & -i & 1+i \\ 1 & -i & i & 2-i \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & i & 2i & 3i \end{pmatrix}$.

3. 在习题 2 中，把梯形矩阵的各行矢量表示成原来矩阵各行矢量的线性组合.

4. 检验下列各组矢量是否线性相关：

(a) (1, 0, 1), (0, 2, 2), (3, 7, 1) 在 $\mathbf{Q}^3$ 中或在 $\mathbf{C}^3$ 中.

(b) (0, 0, 0), (1, 0, 0), (0, 1, 1) 在 $\mathbf{R}^3$ 中.

(c) $(1, i, 1+i)$, $(i, -1, 2-i)$, (0, 0, 3) 在 $\mathbf{C}^3$ 中.

(d) (1, 1, 0), (1, 0, 1), (0, 1, 1) 在 $\mathbf{Z}_2^3$ 中和在 $\mathbf{Z}_3^3$ 中.

在线性相关的各种情况中，取出生成相同行空间的线性无关子集.

5. 在 $\mathbf{Q}^6$ 中检验下列各组矢量的线性无关性，并找出张成子空间的基底：

(a) (2, 4, 3, −1, −2, 1), (1, 1, 2, 1, 3, 1), (0, −1, 0, 3, 6, 2).

(b) (2, 1, 3, −1, 4, −1), (−1, 1, −2, 2, −3, 3), (1, 5, 0, 4, −1, 7).

6. 把习题 5 中两组矢量放在一起，找出张成子空间的基底.

7. 求出下列矩阵的秩和矩阵行空间的基底：

(a) $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 4 \\ 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}$, (b) $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 3 & 2 \\ -1 & -3 & 0 & 4 \\ 0 & 4 & -1 & -3 \end{pmatrix}$,

(c) $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 5 & 7 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}$.

8. 列出含有两个非零行矢量的2×4简化梯形矩阵的所有可能形式.(这些产生"格拉斯曼(Grassmann)流形"的胞腔剖分，这里流形的点是四维空间中通过原点的平面.)

9. 证明：$m\times n$ 矩阵的秩,既不超过m也不超过n.

10. 如果$m\times(n+k)$ 矩阵B是由$m\times n$ 矩阵A再添上k个新的列构成的,那么$\text{rank}(A)\leqslant\text{rank}(B)$.

11. 直接证明(不用定理 8)：任意矩阵A行等价于一个梯形矩阵(不一定是简化梯形矩阵).

§7.7 矢量方程·齐次方程

当我们想要求解形为

$$\lambda=x_1\alpha_1+\cdots+x_m\alpha_m \tag{23}$$

($\alpha_1,\cdots,\alpha_m$ 为 F^n 中固定矢量, λ 为任意矢量)

的一些矢量方程时,用矩阵代替线性方程组(21),并对矩阵使用初等行运算,这样做是特别方便的.

例如,设 $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ 是 §7.6 的例中给出的矢量，设 $\lambda=(2,7,-1,-6)$. 把矩阵A化为梯形矩阵 C,我们先解方程

$$\lambda=y_1\gamma_1+y_2\gamma_2+y_3\gamma_3=y_1\gamma_1+y_2\gamma_2.$$

比较等式两边的第一个分量，我们得 $y_1=2$；比较第二个分量，我们则得 $7=-y_1+y_2$ 即 $y_2=9$. 因此，如果λ确实是 $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ 的线性组合,那么我们一定有

$$\lambda=2\gamma_1+9\gamma_2=2\alpha_1-3\beta_2=2\alpha_1-3(\alpha_2-2\alpha_1)=8\alpha_1-3\alpha_2,$$

计算 $8\alpha_1-3\alpha_2$ 的第三，四分量，我们看出 λ 的确是 $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ 的线性组合.

因为 $\gamma_3=-7\alpha_1+2\alpha_2+\alpha_3=\mathbf{0}$，所以在上述情况下(23)的另一些解是

$$\lambda=(8-7y)\alpha_1+(-3+2y)\alpha_2+y\alpha_3,$$

其中 y 是任意的. 这确实是(23)的最一般的解. 如果矢量 λ 换成 $\lambda'=(2,7,1,-6)$，则上面过程指出 λ' 根本不可能表示为 $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ 的线性组合.

事实上，当含有几个矢量 λ 时，常常最好是把含有行矢量 $\alpha_1,\cdots,\alpha_m$ 的 $m\times n$ 矩阵变换成含有非零行矢量 $\gamma_1,\cdots,\gamma_r$ 的简化梯形矩阵 C. 因为矩阵的每个初等行运算只包含有限次有理运算(即加、减、乘、除)，又因为经过有限次初等行运算之后可以把给定的矩阵变换成简化梯形矩阵，所以经有限次有理运算之后，可以把给定的矩阵变换成简化梯形矩阵.

那么，应用定理 9 我们可以得到一组唯一可能的系数 $y_1,\cdots,y_r$ 使得 $\lambda=y_1\gamma_1+\cdots+y_r\gamma_r$. 如果这个方程不是对 γ 的所有分量都成立，那么 λ 就不在 A 的行空间中，因此(23)就没有解. 如果这个方程对 $\gamma_1,\cdots,\gamma_r$ 的所有分量都成立，那么，因为 C 的各行矢量都是 $\alpha_1,\cdots,\alpha_m$ 的线性组合 $\gamma_i=\sum_{j=1}^{m}e_{ij}\alpha_j$，所以我们得到(23)的解为 $\lambda=\sum y_ie_{ij}\alpha_j$，因此我们有 $x_j=y_1e_{1j}+\cdots+y_re_{rj}$. 这就证明了下面的结果.

定理 12 对 F^n 中已知矢量 $\lambda,\ \alpha_1,\ \cdots,\ \alpha_m$，矢量方程 $\lambda=x_1\alpha_1+\cdots+x_m\alpha_m$ 可以通过 F 中的有限次有理运算解出（如果解存在的话）.

推论 设 S 和 T 分别是由矢量 $\alpha_1,\cdots,\alpha_m$ 和 $\beta_1,\cdots,\beta_k$ 张成的 F^n 的子空间，那么关系式 $S\supset T,T\supset S$ 和 $S=T$ 可以通过有限次

有理运算来检验.

这是因为，我们可以由 $\alpha_1, \cdots, \alpha_m$ 经过初等行运算来构造一组非零矢量 $\gamma_1, \cdots, \gamma_r$，它们就是简化梯形矩阵的行矢量，而且还张成 S. 然后我们象上面那样检验 $\beta_1, \cdots, \beta_k$ 是否都是 $\gamma_1, \cdots, \gamma_r$ 的线性组合，显然这是 $S \supset T$ 的充分必要条件. 把前面的过程反过来，我们可以确定是否 $T \supset S$. 这两个过程结合起来可以检验 $S=T$ 是否成立. 另外还可以把以 $\alpha_1, \cdots, \alpha_m$ 为行矢量的矩阵和以 $\beta_1, \cdots, \beta_k$ 为行矢量的矩阵都变换成简化梯形矩阵，来检验 $S=T$ 是否成立，因为 $S=T$ 成立当且仅当它们的简化梯形矩阵具有相同的非零矢量.

简化梯形矩阵还可以用来确定形为

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n &= 0, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n &= 0, \\ &\cdots\cdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n &= 0 \end{aligned} \tag{24}$$

的齐次线性方程组的解. 我们设 S 是 F^n 中所有满足 (24) 的矢量 $\xi=(x_1, \cdots, x_n)$ 的集合. 容易验证 S 是一个子空间. 我们将指出如何确定这个子空间的基底.

首先看到，同 § 2.3 一样，用初等行运算作用在方程组 (24) 上可以把它变换成等价的方程组，特别是，当作用到 $m \times n$ 矩阵 A (它的第 i 行是(24)的第 i 个方程的系数 $(a_{i1}, \cdots, a_{in})$)时，这些运算把 A 变成具有相同"解矢量" $\xi=(x_1, \cdots, x_n)$ 的集合 S 的另一个矩阵. 现在把 A 化为简化梯形矩阵，其中首元素都为 1，位于第 $t_1, \cdots, t_r$ 列上. 相应的方程组有 r 个非零方程，并且第 i 个方程是含有未知数 x_{t_i} 的唯一的方程.

为使记号简单，假定首元素出现在前 r 列(事实上，只要对未知数 $x_1, \cdots, x_n$，也就是对 A 的各列，作适当的置换，这是可以办到

的)．那么化简后的方程组具有形式

$$
\begin{aligned}
&x_1+c_{1,r+1}x_{r+1}+\cdots+c_{1n}x_n=0,\\
&x_2+c_{2,r+1}x_{r+1}+\cdots+c_{2n}x_n=0,\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (25)\\
&x_r+c_{r,r+1}x_{r+1}+\cdots+c_{rn}x_n=0.
\end{aligned}
$$

在这个简化了的形式中，任意选取 $x_{r+1},\cdots,x_n$ 的值，并对 $x_1,\cdots,x_r$ 解方程组(25)．得到解矢量

$$
\xi=\left(-\sum_{j=r+1}^{n}c_{1j}x_j,\cdots,-\sum_{j=r+1}^{n}c_{rj}x_j,x_{r+1},\cdots,x_n\right). \qquad (26)
$$

显然我们就可以得到方程组(25)的一切解．特别，在参数 $x_{r+1},\cdots,x_n$ 中，令其中一个为 1，其他为 0，我们就得到 $n-r$ 组解

$$
\begin{aligned}
&\xi_{r+1}=(-c_{1,r+1},\cdots,-c_{r,r+1},1,0,\cdots,0),\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
&\xi_n=(-c_{1n},\cdots,-c_{rn},0,0,\cdots,1).
\end{aligned}
$$

这 $n-r$ 个解矢量是线性无关的(因为前 r 个坐标全都忽略，它们是线性无关的)．公式(26)表明，一般解 ξ 刚好是这 $n-r$ 个基本解的线性组合 $\xi=x_{r+1}\xi_{r+1}+\cdots+x_n\xi_n$．于是我们就找到了已知方程组(24)的解矢量空间 S 的一组基底，因此证明了

定理 13 含有 n 个未知数的 r 个线性无关的齐次线性方程组，它的所有解 $(x_1,\cdots,x_n)$ 组成的“解空间”的维数为 $n-r$．

推论 含有 n 个未知数 $x_1,\cdots,x_n$ 的 n 个线性无关的齐次线性方程组的唯一解是

$$
x_1=x_2=\cdots=0.
$$

例 设 S 是由方程 $x_1+x_2=x_3+x_4$ 和 $x_1+x_3=2(x_2+x_4)$ 定义的．这样，在几何上，S 是四维空间中两个三维超平面的交．这些方程的矩阵化简如下

$$\begin{pmatrix}1 & 1 & -1 & -1\\ 1 & -2 & 1 & -2\end{pmatrix}\to\begin{pmatrix}1 & 1 & -1 & -1\\ 0 & -3 & 2 & -1\end{pmatrix}$$

$$\to\begin{pmatrix}1 & 4 & -3 & 0\\ 0 & -3 & 2 & -1\end{pmatrix}.$$

最后一个矩阵(除了符号和列序外)是简化梯形矩阵. 这就得出等价方程组 $x_1+4x_2-3x_3=0$, $-3x_2+2x_3-x_4=0$, 它具有一般解为

$$\xi=(3x_3-4x_2,\ x_2,\ x_3,\ -3x_2+2x_3),$$

令 $x_2=0, x_3=1$ 和 $x_2=1, x_3=0$ 得到解空间的一组基底(3, 0, 1, 2)和(−4, 1, 0, −3).

根据对偶原则, 我们可以得到由任意子空间的一切矢量所满足的线性方程组的基底. 例如, 设 T 是 F^4 中由矢量(1, 1, −1, −1)和(1, −2, 1, −2)张成的子空间. 那么齐次线性方程 $\sum a_i x_i=0$ 对 T 中所有矢量 (x_1, x_2, x_3, x_4) 是恒等式当且仅当 $a_1+a_2=a_3+a_4$ 和 $a_1+a_3=2(a_2+a_4)$. 满足这些方程的系数矢量 (a_1, a_2, a_3, a_4) 的集合的基底前面已经求出, 把那里的 x 用 a 代替.

上述例子的线性方程 $x_1+x_2-x_3-x_4=0$ 和 $x_1-2x_2+x_3-2x_4=0$ 等价于矢量方程

$$x_1(1, 1)+x_2(1, -2)+x_3(-1, 1)+x_4(-1, -2)=(0, 0).$$

它的解是二维空间 F^2 中四个矢量(1, 1), (1, −2), (−1, 1), (−1, −2)之间所有线性依赖关系. 它还可以象 § 7.5 那样, 把以这四个矢量作为行矢量的 4×2 矩阵化简成梯形矩阵来求解, 这个矩阵可以从前面的 2×4 矩阵经过转置行和列而得到.

习　题

1. 设 $\xi_1=(1, 1, 1)$, $\xi_2=(2, 1, 2)$, $\xi_3=(3, 4, -1)$, $\xi_4=(4, 6, 7)$, 求出不全为零的数值 c_i 满足 $c_1\xi_1+c_2\xi_2+c_3\xi_3+c_4\xi_4=0$.

2. 设 $\eta_1=(1+i, 2i)$, $\eta_2=(2, -3i)$, $\eta_3=(2i, 3+4i)$, 求出所有满足 $c_1\eta_1+c_2\eta_2+c_3\eta_3=0$ 的复数 c_i.

3. 求出两个矢量，使它们张成由所有满足 $x_1+x_2=x_3-x_4=0$ 的矢量 (x_1, x_2, x_3, x_4) 组成的子空间.

4. 求出两个矢量,使它们张成由所有满足

$$3x_1-2x_2+4x_3+x_4=x_1+x_2-3x_3-2x_4=0$$

的矢量 (x_1, x_2, x_3, x_4) 组成的子空间.

5. 求出下列各方程组解矢量空间的基底:

(a) $x+y+3z=0,$
$2x+2y+6z=0;$

(b) $x+y+z=0,$
$y+z+t=0;$

(c) $x+2y-4z=0,$
$3x+y-2z=0;$

(d) $x+y+z+t=0,$
$2x+3y-z+t=0,$
$3x+4y+2t=0.$

6. 把习题5中的方程式换成模5同余式,求同余式组解矢量空间的基底.

7. 确定下列各矢量方程(有理数域上)是否有解. 如果有解，就求出它的一组解.

(a) $(1,-2)=x_1(1,1)+x_2(2,3),$

(b) $(1,1,1)=x_1(1,-1,2)+x_2(2,1,3)+x_3(1,-1,0),$

(c) $(2,-1,1)=x_1(2,0,3)+x_2(3,1,2)+x_3(1,2,-1).$

8. 在 $\mathbf{Q}^4$ 中，设 $\alpha_1=(1,1,2,2)$，$\alpha_2=(1,2,3,4)$，$\alpha_3=(0,1,3,2)$和 $\alpha_4=(-1,1,-1,1)$. 把下列各矢量表示成形式 $x_1\alpha_1+x_2\alpha_2+x_3\alpha_3+x_4\alpha_4$.

(a) $(1,0,1,0)$　　(b) $(3,-2,1,-1)$

(c) $(0,1,0,0)$　　(d) $(2,-2,2,-2)$

9. 证明：对 $m\times n$ 矩阵至多进行 m^2 次初等行运算就可以把它变换成行简化矩阵.

10. 证明：对 4×6 矩阵至多进行 56 次乘法，42 次加减法和 4 次互换运算(象 $aa^{-1}=1$，$a-a=0$ 或 $0\cdot a=0$ 都没有计算在内)就可变换成行简化矩阵.

*11. 对 $n\times n$ 矩阵叙述并证明类似于习题 10 的结果.

§7.8 基底与坐标系

我们已经把张成矢量空间 V 的一组线性无关矢量定义为空间 V 的基底. 基底的实际意义在于，空间 F^n 的任意基底的矢量在适

当选取的坐标系下可以看作空间的单位矢量. 这个证明依赖于下面的定理.

定理 14 如果 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 是 V 的一组基底，那么 V 的每个矢量 ξ 可唯一地表示成 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 的线性组合

$$\xi = x_1\alpha_1 + \cdots + x_n\alpha_n. \tag{27}$$

证明 因为 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 是 V 的一组基底，它们张成 V，所以 V 中的每个矢量至少有一种方式表示成 (27) 的形式. 如果某个矢量 $\xi \in V$ 有第二种这样的表示式 $\xi = x_1'\alpha_1 + \cdots + x_n'\alpha_n$，那么从(27)中减去它，重新合并一下就得出

$$\mathbf{0} = \xi - \xi = (x_1 - x_1')\alpha_1 + \cdots + (x_n - x_n')\alpha_n.$$

因为 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 是一组基底，它们是线性无关的，所以从上面的等式推出 $x_1 - x_1' = \cdots = x_n - x_n' = 0$，因此每个 $x_i = x_i'$，于是表示式(27)是唯一的.

我们把(27)式中的标量 x_i 称为矢量 ξ 关于基底 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 的坐标. 如果

$$\eta = y_1\alpha_1 + y_2\alpha_2 + \cdots + y_n\alpha_n$$

是 V 中第二个矢量，其坐标为 $y_1, \cdots, y_n$，那么由矢量代数的恒等式，有

$$\xi + \eta = (x_1 + y_1)\alpha_1 + \cdots + (x_n + y_n)\alpha_n. \tag{28}$$

口头上说就是，矢量和关于任意基底的坐标可以通过把被加矢量相应的坐标相加来求得. 类似地，形为(27)的矢量 ξ 与标量 c 的乘积是

$$c\xi = c(x_1\alpha_1 + \cdots + x_n\alpha_n) = (cx_1)\alpha_1 + \cdots + (cx_n)\alpha_n, \tag{29}$$

所以 $c\xi$ 的每个坐标是 c 和 ξ 的相应坐标的乘积.

类似于整环同构和群同构定义，现在我们定义同一域 F 上的两个矢量空间 V 和 W 之间的同构 C: $V \to W$ 是，由 V 到 W 上适合下面条件的一一对应 $\xi \mapsto \xi C$:

$$(\xi+\eta)C=\xi C+\eta C \text{ 和} (c\xi)C=c(\xi C), \tag{30}$$

(对 V 中一切矢量 ξ,η, 对 F 中一切标量 c)

那么公式 (28) 和 (29) 表明, F 上的矢量空间 V 的每一组基底 $\alpha_1,\cdots,\alpha_n$ 提供了一个由 V 到 F^n 上的同构. 这个同构就是对应 C_α, 它赋给 V 中每个矢量 ξ 关于基底 $\alpha_1,\cdots,\alpha_n$ 的坐标的 n-数组, 即

$$(x_1\alpha_1+\cdots+x_n\alpha_n)C_\alpha=(x_1,\cdots,x_n)\in F^n. \tag{31}$$

因为基底矢量的个数 n 是由空间的维数 n 确定, 而它是不变的(定理 5 的推论 1), 所以我们就证明了

定理 15 域 F 上的任意有限维矢量空间与一个且只与一个空间 F^n 同构.

这样我们就解决了确定(精确到同构)所有有限维矢量空间的问题. 而且我们已经指出, 同一矢量空间的一切基底在同构意义下是等价的, 即存在 V 的一个同构, 它把任意一组基底映射到其他任意一组基底.

一个矢量空间可以有很多不同的基底. 例如, 根据定理 7, 我们从 $\varepsilon_1,\cdots,\varepsilon_n$ 出发逐次使用初等行运算而得到 F^n 的任何一组矢量, 它是 F^n 的一组基底. 特别, 对任何使 $1+1\neq 0$ 的域 F, $\alpha_1=(1,1,0)$, $\alpha_2=(0,1,1)$, 和 $\alpha_3=(1,0,1)$ 是 F^3 的一组基底. 同样, 在普通三维空间中任意三个非共面矢量确定了"斜角坐标"矢量的一组基底.

再有, 如果在复数域 $\mathbf{C}$ 中只考虑复数加法和复数的数乘(用实数乘) 而不管其他所有代数运算, 那么复数域 $\mathbf{C}$ 可以看作实数域 $\mathbf{R}$ 上的矢量空间. 这个空间的维数是 2, 因为 1 和 i 构成一组基底, 它们分别生成实数和纯虚数的子空间. $1+i$ 和 $1-i$ 两个数构成 $\mathbf{R}$ 上空间 $\mathbf{C}$ 的另一组基底, 但这组基底用起来不方便.

另外, 考虑齐次线性微分方程

$$\frac{d^2x}{dt^2}-3\frac{dx}{dt}+2x=0.$$

不难验证，这个方程的两个解的和 $x_1(t)+x_2(t)$ 还是方程的解，一个解同任意(实)常数的乘积也是方程的解. 因此这个微分方程的所有解组成的集合 V 是一个矢量空间，有时称它为微分方程的“解空间”. 描述这个空间的最容易的办法是说，e^t 和 e^{2t} 构成这个解空间的一组基底，这就意味着一般解可以唯一地表示成形式 $x=c_1e^t+c_2e^{2t}$.

最后，域 F 上关于未定元 x 的所有多项式形式构成的整环 $F[x]$ 是 F 上的矢量空间，因为在 $F[x]$ 中矢量空间的一切公设都满足. 多项式相等的定义用于方程 $p(x)=0$，就意味着所有的幂 1, $x, x^2, x^3, \cdots$ 在 F 上线性无关. 因此这些幂组成了 $F[x]$ 的一组无穷基底，因为任意矢量(多项式形式)可以表示成这组基底的有限子集的线性组合.

在 $\mathbf{R}^3$ 中，通过原点的平面 S 和通过原点但不在 S 中的直线 T 张成整个空间，所以空间中任意矢量可以唯一地表示成这个平面上的一个矢量与这条直线上的一个矢量的和. 更一般地，设 S 和 T 是矢量空间 V 的子空间，如果 V 的每个矢量 ξ 可以唯一地表示成 S 的一个矢量和 T 的一个矢量的和：

$$\xi=\sigma+\tau, \sigma\in S, \tau\in T \tag{32}$$

那么我们称 V 是两个子空间 S 和 T 的*直和*(直接和).

因为 $(\sigma+\tau)+(\sigma'+\tau')=(\sigma+\sigma')+(\tau+\tau')$，所以对应 $(\sigma,\tau)\mapsto(\sigma+\tau)$ 是由矢量空间 V 的加法群映上到 S 和 T 的加法群的直积(§6.11)的一个同构. 更一般地，F^n 是 F 的加法群的 n 重直积(作为加法群)，记作 $F^n=F\times F\times\cdots\times F$($n$ 个因子).

反过来，如果 S 和 T 是同一个域 F 上的任意给定的两个矢量空间，那么我们可以定义一个新的矢量空间 $V=S\oplus T$，它的加法

群是 S 和 T 的加法群的直积，它的数乘运算由公式 $c(\eta,\zeta)=(c\eta, c\zeta)$（对一切 $c\in F$）来定义. 在这个空间 V 中，$(\eta,0)$ 和 $(0,\zeta)$ 组成的子集合分别构成与 S 和 T 同构的子空间，而且按上面的定义，V 是这两个子空间的直和. 我们也把 $S\oplus T$ 说成已知矢量空间 S 和 T 的直和.

定理 16 如果有限维矢量空间 V 是它的子空间 S 和 T 的直和，那么 S 的任意基底和 T 的任意基底的并就是 V 的一组基底.

证明 设 S 和 T 的基底分别是 $\beta_1,\cdots,\beta_k$ 和 $\gamma_1,\cdots,\gamma_m$；我们希望证明 $\beta_1,\cdots,\beta_k,\gamma_1,\cdots,\gamma_m$ 是 V 的一组基底. 首先，这些矢量张成 V，这因为 V 中任意矢量 ξ 可写成 $\xi=\eta+\zeta$，其中 η 是 $\beta_1,\cdots,\beta_k$ 的线性组合，ζ 是 $\gamma_1,\cdots,\gamma_m$ 的线性组合. 其次，这些矢量是线性无关的，这因为如果

$$\mathbf{0}=b_1\beta_1+\cdots+b_k\beta_k+c_1\gamma_1+\cdots+c_m\gamma_m, \tag{33}$$

那么 $\mathbf{0}$ 就表示成 S 中矢量 $\eta_0=\sum b_i\beta_i$ 与 T 中矢量 $\xi_0=\sum c_j\gamma_j$ 之和. 但是 $\mathbf{0}=\mathbf{0}+\mathbf{0}$ 是 $\mathbf{0}$ 作为 S 的矢量与 T 的矢量之和的另一表示. 根据假设，表示是唯一的，所以 $\mathbf{0}=\eta_0=\sum b_i\beta_i$ 和 $\mathbf{0}=\sum c_j\gamma_j$. 但是 $\beta_1,\cdots,\beta_k$ 线性无关，$\gamma_1,\cdots,\gamma_m$ 线性无关，因此 $b_1=\cdots=b_k=0$，和 $c_1=\cdots=c_m=0$. 于是关系式(33)只当所有系数为零时才成立，因此 $\beta_1,\cdots,\beta_k,\gamma_1,\cdots,\gamma_m$ 确实线性无关.

这个定理及其证明可以很容易地推广到有限多个子空间的直和的情形.

推论 如果有限维矢量空间 V 是它的子空间 S 和 T 的直和，那么

$$d[V]=d[S]+d[T]. \tag{34}$$

式中 $d[V]$ 表示空间 V 的维数，等等.

证明 因为空间的维数等于(任意)基底矢量的个数，所以上述证明表明，如果 $d[S]=k, d[T]=m$，则 $d[V]=k+m$. 证毕

当V是S和T的直和时，我们称S和T是V的补子空间. 那么我们有

$$S+T=V, \quad S\cap T=\mathbf{0} \tag{35}$$

事实上，(32)式指出V是子空间S和T的线性和. 断言$S\cap T=\mathbf{0}$证明如下，如果ξ_1是S和T的任意公共矢量，那么ξ有形为(32)的两种表示$\xi_1=\xi_1+\mathbf{0}$或$\xi_1=\mathbf{0}+\xi_1$；因为这两种表示一定是一样的，所以$\xi_1=\mathbf{0}$，因此交$S\cap T$是零矢量. 反过来我们可以证明，如果条件(35)成立，则V是S和T的直和. 于是，在这种情况下，关系式(34)可写为

$$d[V]=d[S+T]+d[S\cap T]=d[S]+d[T].$$

上面的后一个等式对任意两个子空间情形也成立.

定理 17 设S和T是矢量空间V的任意两个有限维子空间，那么

$$d[S]+d[T]=d[S\cap T]+d[S+T]. \tag{36}$$

证明 设$\xi_1,\cdots,\xi_n$是$S\cap T$的一组基底，根据定理 6，S和T分别有基底$\xi_1,\cdots,\xi_n,\ \eta_1,\cdots,\eta_r$和$\xi_1,\ \cdots,\ \xi_n,\ \zeta_1,\ \cdots,\ \zeta_s$. 显然$\xi_1,\cdots,\xi_n,\ \eta_1,\cdots,\eta_r,\ \zeta_1,\cdots,\zeta_s$一起张成$S+T$. 它们也是一组基底，这因为

$$a_1\xi_1+\cdots+a_n\xi_n+b_1\eta_1+\cdots+b_r\eta_r+c_1\zeta_1+\cdots+c_s\zeta_s=\mathbf{0}$$

推出$\sum b_j\eta_j=-\sum a_i\xi_i-\sum c_k\zeta_k$在$T$中，因此它在$S\cap T$中，所以$\sum b_j\eta_j=\sum d_i\xi_i$，其中$d_i$是某一组标量. 因为$\xi_i$和$\eta_j$线性无关，因此每个$b_i$必为 0. 类似地，每个$c_k=0$，代入原式得$\sum a_i\xi_i=\mathbf{0}$，所以每个$a_i=0$. 这就证明了$\xi_1,\cdots,\xi_n,\ \eta_1,\cdots,\eta_r,\ \zeta_1,\cdots,\zeta_s$是$S+T$的一组基底.

证明了这个之后，我们看到定理的结论归结为算术公式$(n+r)+(n+s)=n+(n+r+s)$.

习　题

1. 在 § 7.6 的习题 4 中，指出哪些矢量集合是包含它们的空间的基底.

2. 在 $\mathbf{Q}^4$ 中求出单位矢量 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 关于基底 $\alpha_1=(1,1,0,0)$，$\alpha_2=(0,0,1,1)$，$\alpha_3=(1,0,0,4)$，$\alpha_4=(0,0,0,2)$ 的坐标.

3. 求出矢量 $(1,0,1)$ 关于 $\mathbf{C}^3$ 的基底

$$(2i,1,0),\quad (2,-i,1),\quad (0,1+i,1-i)$$

的坐标.

4. 在 $\mathbf{Q}^4$ 中求出

(a) 包含矢量 $(1,2,1,1)$ 的基底；

(b) 包含矢量 $(1,1,0,2)$ 和 $(1,-1,2,0)$ 的基底；

(c) 包含矢量 $(1,1,0,0)$，$(0,0,2,2)$，$(0,2,3,0)$ 的基底.

5. 证明：以有理数 $a,\cdots,e$ 为系数的数

$$a+b\sqrt{2}+c\sqrt{3}+d\sqrt{6}+e\sqrt{12}$$

的全体构成一个交换环，这个环是有理数域 $\mathbf{Q}$ 上的矢量空间. 求出这个空间的一组基底.

6. 在 $\mathbf{Q}^4$ 中，两个子空间 S 和 T 分别由下面矢量张成：

S：$(1,-1,2,-3)$，$(1,1,2,0)$，$(3,-1,6,-6)$，

T：$(0,-2,0,-3)$，$(1,0,1,0)$，

求出 $S, T, S\cap T$ 和 $S+T$ 的维数.

*7. 对一般的域 $\mathbf{Z}_p^4$ 解习题 6.

8. 设 S 和 T 是 F^n 中具有固定维数分别为 s 和 t 的可变的子空间，求 $S+T$ 的最大可能维数和 $S\cap T$ 的最小可能维数. 证明你的结论.

*9. 证明：对于子空间，由 $S\cap T=S\cap T'$，$S+T=S+T'$ 和 $T\subset T'$，可推出 $T=T'$.

10. 设 S 是有限维矢量空间 V 的子空间，证明：存在 V 的一个子空间 T，使得 V 是 S 和 T 的直和.

*11. 设 $S_1,\cdots,S_p$ 是 V 的子空间，如果 V 的每个矢量 ξ 具有唯一的表示 $\xi=\eta_1+\cdots+\eta_p$，其中 $\eta_i\in S_i$，则称 V 是 $S_1,\cdots,S_p$ 的直和. 对这样的直和叙述并证明与定理 10 相类似的定理.

12. 证明：V 是 S 和 T 的直和当且仅当 (35) 成立.

*13. 对 p 个子空间的直和叙述并证明与习题 12 相类似的定理.

14. 矢量空间V的自同构指的是V同它自身的同构.

(a) 证明: 对应$(x_1, x_2, x_3)\mapsto(x_2, -x_1, x_3)$是$F^3$的自同构.

(b) 证明: V的所有自同构组成的集合是V上的变换群.

15. F^2的一个自同构把$(1,0)$映射到$(0,1)$, 把$(0,1)$映射到$(-1,-1)$. 它的阶是多少? 你的答案依赖于基域吗?

*16. 建立有限维矢量空间的自同构和它的有序基底之间的一一对应(参看习题14). $\mathbf{Z}_2$有多少自同构? $\mathbf{Z}_p^n$呢?

§7.9 内 积

普通空间是实数域上的三维矢量空间, 它记作$\mathbf{R}^3$. 在这个空间中可以用公式来定义矢量的长度和矢量之间的夹角(包括直角), 这些公式不仅顺利地推广到$\mathbf{R}^n$空间, 而且还推广到无穷维实矢量空间(见§7.10的例2). 这些推广将是§7.9～§7.11中的课题.

为了建立有关的公式, 我们需要另外一种运算. 为此目的, 最方便的是做内积的运算. 含有实分量的两个矢量$\xi=(x_1, \cdots, x_n)$和$\eta=(y_1, \cdots, y_n)$的内积指的是数量

$$(\xi, \eta)=x_1y_1+x_2y_2+\cdots+x_ny_n. \tag{37}$$

(因为这是一个标量, 所以物理学家常常把我们上面的内积说成两个矢量的"标量积".) 内积有四个重要性质, 这些性质都是定义(37)的直接结论:

$$(\xi+\eta, \zeta)=(\xi, \zeta)+(\eta, \zeta), \quad (c\xi, \eta)=c(\xi, \eta); \tag{38}$$

$$(\xi, \eta)=(\eta, \xi), \quad (\xi, \xi)>0 \quad 除非\ \xi=\mathbf{0}. \tag{39}$$

前两个定律表明内积对于左边因子是线性的; 第三个定律是对称律, 因此同前两个公式一起得出, 内积对于左右因子都是线性的(双线性); 第四个定律是正性律.

例如, 计算平面R^2中矢量ξ的长度$|\xi|$(也称为"绝对值"或"模")的笛卡儿公式给出这个长度是内积的平方根

$$|\xi|=\sqrt{x_1^2+x_2^2}=(\xi,\xi)^{\frac{1}{2}}. \tag{40}$$

三维空间中的长度用一个类似的公式来计算. 再有, 如果 α 和 β 是任意两个矢量, 那么对于以 α, β, $\gamma=\beta-\alpha$ 为三边的三角形(图 2), 由三角余弦定理得到

$$|\beta-\alpha|^2=|\alpha|^2+|\beta|^2-2|\alpha|\cdot|\beta|\cdot\cos C,$$

$(C=\angle(\alpha,\beta))$. 而根据(38)和(40)有

$$|\beta-\alpha|^2=(\beta-\alpha,\beta-\alpha)=(\beta,\beta)-2(\alpha,\beta)+(\alpha,\alpha),$$

与上式合并并消去一些项, 我们得到

$$\cos\angle(\alpha,\beta)=\frac{(\alpha,\beta)}{|\alpha|\,|\beta|}. \tag{41}$$

也就是说, 两个矢量 α 和 β 之间的夹角 $\angle(\alpha,\beta)$ 的余弦是这两个矢量的内积与它们长度之积的比. 由这个公式可以得到, 几何上两个矢量 α 和 β **正交**(或垂直)当且仅当内积 (α,β) 为零.

由于矢量加法和数乘运算容易推广到任意域上的任意维空间中去, 自然希望把长度和角度的概念做类似的推广. 然而, 当我们这样推广时却发现, 虽然维数可以是任意的, 但是推广到很多数域时产生了麻烦. 即使内积可以由(37)定义, 但是长度

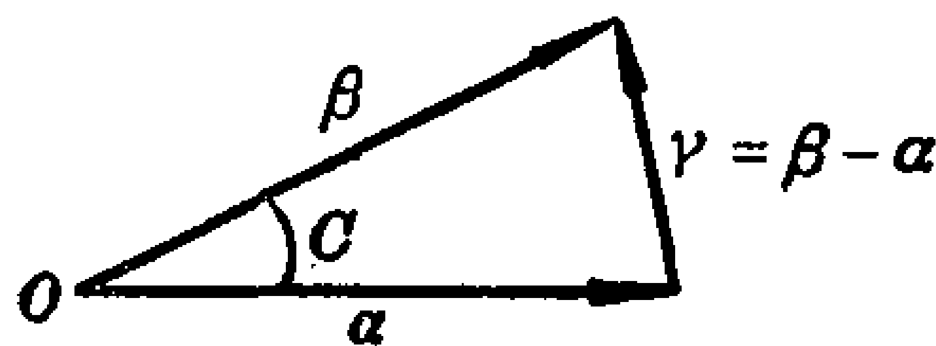


图 2

$$|\xi|=(\xi,\xi)^{\frac{1}{2}}=(x_1^2+x_2^2+\cdots+x_n^2)^{\frac{1}{2}} \tag{42}$$

是没有定义的, 除非每个 n 平方和有平方根. 对于距离也有同样问题, 而角度的推广引起更多的困难.

由于这些原因, 我们现在只限于讨论实数域上矢量空间中的长度、角度和有关课题. 在 § 9.12 中我们将讨论复数域上相应的概念.

习　题

1. 用解析几何方法证明：在平面上，矢量 $\xi=(x_1, x_2)$ 和 $\eta=(y_1, y_2)$ 之间的距离平方等于 $|\xi|^2+|\eta|^2-2(\xi, \eta)$.

2. 利用三维空间中的方向余弦证明：两个矢量 ξ 和 η 正交当且仅当 $(\xi, \eta)=0$.

3. 如果复分量矢量 ξ 的长度是由公式(42)定义的，证明：存在长度为零的非零矢量.

4. 证明：在域 $\mathbf{Z}_3$ 和 $\mathbf{Q}$ 中存在一个二平方和，它没有平方根.

5. 从定义(37)，证明公式(38)和(39).

6. 证明类似于(38)的公式，这个公式断言：内积对于右边因子是线性的.

7. 证明：任意平行四边形对角线长度的平方和等于它四个边长的平方和.

*8. 在 $\mathbf{R}^3$ 中用

$$\xi\times\eta=(x_2y_3-x_3y_2, x_3y_1-x_1y_3, x_1y_2-x_2y_1)$$

定义两个矢量 ξ 和 η 的外积.

(a) 证明：$(\xi\times\eta, \zeta\times\tau)=(\xi, \zeta)(\eta, \tau)-(\xi, \tau)(\eta, \zeta)$.

(b) 设 $\xi=\zeta, \eta=\tau$，推导 $\mathbf{R}^3$ 中的施瓦兹 (Schwarz) 不等式作为(a)的推论.（参看定理 18.）

(c) 证明 $\xi\times(\eta\times\zeta)=(\xi, \zeta)\eta-(\xi, \eta)\zeta$.

§7.10　欧几里得矢量空间

对维数不加限制的几何讨论是建立在下面定义的基础上，这个定义是根据 §7.9 的考虑而提出来的.

定义　一个具有实标量的矢量空间 E，如果 E 中任意两个矢量 ξ 和 η 对应一个(实的)内积 (ξ,η)，它在(38)和(39)意义下具有对称性、双线性和正性，那么 E 称为欧几里得矢量空间.

例 1　任意 $\mathbf{R}^n$，如果其中 (ξ, η) 是由(37)式定义，那么它是 n 维欧几里得矢量空间.

例 2 定义在区间 $0 \leqslant x \leqslant 1$ 上的全体连续实函数 $\phi(x)$，如果我们定义内积 $(\phi, \psi)=\int_0^1 \phi(x)\psi(x)dx$，那么它构成一个无穷维欧几里得矢量空间.

欧几里得矢量空间 E 的矢量 ξ 的长度 $|\xi|$ 可以定义为内积的平方根 $(\xi, \xi)^{\frac{1}{2}}$——(39)的正性条件保证了平方根的存在.

定理 18 在任意欧几里得矢量空间中，长度具有下列性质：

(i) $|c\xi|=|c|\cdot|\xi|$.

(ii) $|\xi|>0$，除非 $\xi=\mathbf{0}$.

(iii) $|(\xi, \eta)| \leqslant |\xi|\cdot|\eta|$ （施瓦兹不等式）.

(iv) $|\xi+\eta| \leqslant |\xi|+|\eta|$ （三角形不等式）.

证明 因为 $(c\xi, c\xi)=c^2(\xi, \xi)$，所以我们有性质(i). 性质(ii)是欧几里得矢量空间的定义中所要求的正性条件的推论.

性质(iii)的证明并不直接. 如果 $\xi=\mathbf{0}$ 或者 $\eta=\mathbf{0}$，那么(iii)归结为平凡的不等式 $0 \leqslant 0$. 否则，

$$0 \leqslant (a\xi \pm b\eta, a\xi \pm b\eta)=a^2(\xi, \xi) \pm 2ab(\xi, \eta)+b^2(\eta, \eta)$$

令 $a=|\eta|, b=|\xi|$，故 $a^2=(\eta, \eta), b^2=(\xi, \xi)$. 代入上式则有

$$\mp 2|\xi|\cdot|\eta|\cdot(\xi, \eta) \leqslant 2(\xi, \xi)(\eta, \eta)=2|\xi|^2\cdot|\eta|^2. \tag{43}$$

两边除以 $2|\xi|\cdot|\eta|>0$，我们就得性质(iii).

由(iii)容易得到性质(iv)，这因为

$$\begin{aligned}|\xi+\eta|^2&=(\xi+\eta, \xi+\eta)=(\xi, \xi)+2(\xi, \eta)+(\eta, \eta)\\&\leqslant |\xi|^2+2|\xi|\cdot|\eta|+|\eta|^2=(|\xi|+|\eta|)^2.\end{aligned}$$

现在，如果我们定义 E 中任意两个矢量 ξ 和 η 之间的距离为 $|\xi-\eta|$，则我们可以证明它具有普通距离的所谓“度量”性质，首先是由弗雷谢(Fréchet, 1906)做了抽象的考虑.

定理 19 距离具有性质：

$(M1)$ $|\xi-\xi|=0$，而当 $\xi \neq \eta$，$|\xi-\eta|>0$.

(M2) $|\xi-\eta|=|\eta-\xi|$. (对称性)

(M3) $|\xi-\eta|+|\eta-\zeta|\geqslant|\xi-\zeta|$.

证明 首先，根据性质 (i) 有 $|\xi-\xi|=|0|=|0\cdot\xi|=0\cdot|\xi|=0$，而根据(ii)当 $\xi-\eta\neq 0$（或 $\xi\neq\eta$），有 $|\xi-\eta|>0$，这就证明了 (M1). 其次，根据性质 (i) 有 $|\xi-\eta|=|(-1)(\eta-\xi)|=|-1|\cdot|\eta-\xi|=|\eta-\xi|$，这就证明了(M2). 最后，(M3)由(iv)推出，这因为

$$|\xi-\eta|+|\eta-\zeta|\geqslant|(\xi-\eta)+(\eta-\zeta)|=|\xi-\zeta|.$$

从施瓦兹不等式我们特别推出，对任意非零矢量 ξ，η，有 $-1\leqslant\frac{(\xi,\eta)}{|\xi|\cdot|\eta|}\leqslant 1$. 因此在 0° 和 180° 之间有一个且仅有一个角，它的余弦是$\frac{(\xi,\eta)}{|\xi|\cdot|\eta|}$，我们就可以把这个角定义为矢量 ξ 和 η 之间的夹角（同(41)的特殊情况相比较）. 除了直角的情形外，我们不去证明如此定义的角有什么性质（你能证明$\angle(\xi,\eta)+\angle(\eta,\zeta)\geqslant\angle(\xi,\zeta)$ 吗?）.

两个矢量 ξ 和 η，如果满足$(\xi,\eta)=0$，则称它们是正交的（记作 $\xi\perp\eta$）. 把这个定义用到上面的例 2 中，就得到分析上一个重要概念，即正交函数的概念. 容易证明，如果 $\xi\perp\eta$，则 $\eta\perp\xi$（正交关系是对称的），并且对一切标量 c 和 c' 有 $c\xi\perp c'\eta$. 还有，0 是唯一的与自身正交的矢量. 此外，如果$(\eta,\xi_1)=\cdots=(\eta,\xi_m)=0$，则对任意标量 $c_1,\cdots,c_m$，有

$$\begin{aligned}(\eta,c_1\xi_1+\cdots+c_m\xi_m)&=c_1(\eta,\xi_1)+\cdots+c_m(\eta,\xi_m)\\&=c_1\cdot 0+\cdots+c_m\cdot 0=0.\end{aligned}$$

所以 η 与 $\xi_1,\cdots,\xi_m$ 的每个线性组合也是正交的. 这就证明了

定理 20 如果一个矢量与 $\xi_1,\cdots,\xi_m$ 正交，那么它与由 $\xi_1,\cdots,\xi_m$ 张成的空间中每个矢量正交.

习　题

1. 设 $\xi=(1,2,3,4)$, $\eta=(0,3,-2,1)$, 计算 (ξ,η), $|\xi|$, $|\eta|$, $\angle(\xi,\eta)$.

2. 设 ξ 和 η 如习题 1 所述, 求出形为 $(1,1,0,0)+c_1\xi+c_2\eta$ 并与 ξ 和 η 两个矢量正交的矢量.

3. (a) 在正文的例 2 中, $\sin 2\pi x$ 与 $\cos 2\pi x$ 正交吗?

   (b) $\sin 2m\pi x$ 与 $\sin 2n\pi x$ 正交吗?

   (c) 求出与 1 和 x 正交的二次多项式.

4. 证明: $|\xi-\eta|^2+|\xi+\eta|^2=2(|\xi|^2+|\eta|^2)$.

5. 证明: 在 $\mathbf{R}^3$ 中, 恰好存在两个长度为 1 的矢量同两个已知线性无关矢量垂直.

6. 证明: 在 $\mathbf{R}^3$ 中, 存在一个含有有理坐标的矢量与任意两个给定的含有有理坐标的矢量垂直.

7. 设 $\alpha,\beta\neq\mathbf{0}$ 是欧几里得矢量空间的两个固定矢量, 求出形为 $\gamma=\alpha+t\beta$ 的最短矢量. 这个矢量与 β 正交吗? 画出图来.

*8. 证明: 如果矢量 α 到 β 的距离同到 γ 的距离相等, 那么线段 $\overline{\beta\gamma}$ 的中点是从 α 到 $\overline{\beta\gamma}$ 的垂线的垂足.

9. 证明: 在欧几里得矢量空间中, 如果 $|\xi|=|\alpha|$, 那么 $\xi-\alpha\perp\xi+\alpha$. 从几何上解释这个结论.

*10. (a) 证明: 二次方程

$$(\xi,\xi)t^2+2(\xi,\eta)t+(\eta,\eta)=|t\xi+\eta|^2=0$$

的判别式 B^2-4AC 是 $4[(\xi,\eta)^2-(\xi,\xi)(\eta,\eta)]$.

   (b) 利用上述事实证明施瓦兹不等式.

(提示: $|t\xi+\eta|=0$ 不可能有两个不同的实解 t, 除非 $\xi=\mathbf{0}$.)

11. 证明: 在任意欧几里得矢量空间中, 有 $||\xi|-|\eta||\leq|\xi-\eta|$.

12. 证明: 如果 $\mathbf{R}^3$ 的内积是由

$$(\xi,\eta)=(x_1+x_2)(y_1+y_2)+x_2y_2+(x_2+2x_3)(y_2+2y_3)$$

来定义的, 那么 $\mathbf{R}^3$ 就成为欧几里得矢量空间.

§7.11　标准正交基

在 §7.10 的例 1 中, 单位矢量 $\varepsilon_1=(1,0,\cdots,0)$, $\cdots$, $\varepsilon_n=(0,0,$

$\cdots, 1)$具有单位长度并且互相正交. 这是"标准正交基"的一个例子.

定义 一组矢量 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 满足下列条件时称为标准正交的: (i) 对一切 i, 有 $|\alpha_i|=1$; (ii) 当 $i \neq j$, 有 $\alpha_i \perp \alpha_j$.

引理 1 欧几里得矢量空间 E 的一组非零正交矢量 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 线性无关.

证明 如果 $x_1\alpha_1+\cdots+x_m\alpha_m=\mathbf{0}$, 则对 $k=1, \cdots, m$ 有

$$0=(\mathbf{0}, \alpha_k)=x_1(\alpha_1, \alpha_k)+\cdots+x_m(\alpha_m, \alpha_k)=x_k(\alpha_k, \alpha_k)$$

这里最后一个等式是从正交性的假设得来的. 但是根据假设 $\alpha_k \neq \mathbf{0}$, 因此 $(\alpha_k, \alpha_k)>0$, 所以 $x_k=0$. 证毕

推论 张成空间 E 的标准正交矢量组是 E 的一组基底 (即所谓"标准正交基").

我们现在将指出, 欧几里得矢量空间的任意一组基, 如何只通过有理运算把它正交化. 这称为格拉姆-施密特(Gram-Schmidt)正交化方法.

引理 2 由有限维欧几里得矢量空间 E 的任意一组(有限个)无关矢量 $\gamma_1, \cdots, \gamma_m$, 可以构造一组非零正交矢量

$$\alpha_i=\gamma_i-\sum_{k<i} d_{ik}\gamma_k \qquad (i=1, \cdots, m), \tag{44}$$

它们同 $\gamma_1, \cdots, \gamma_m$ 张成 E 的相同的子空间.

证明 对 m 用归纳法, 我们可以假定非零正交矢量 $\alpha_1, \cdots, \alpha_{m-1}$ 已经构成, 它们同 $\gamma_1, \cdots, \gamma_{m-1}$ 张成相同的子空间 S. 我们现在把 γ_m 分成两部分: "平行"于 S 的部分 β_m 和垂直于 S 的部分 α_m. 为做到这一点, 令

$$\alpha_m=\gamma_m-\sum_{k<m} c_{mk}\alpha_k, \quad \text{其中} \quad c_{mk}=\frac{(\gamma_m, \alpha_k)}{(\alpha_k, \alpha_k)}, \tag{44'}$$

那么对 $j=1, \cdots, m-1$, 我们有

$$(\alpha_m, \alpha_j) = (\gamma_m, \alpha_j) - \sum_{k=1}^{m-1} c_{mk}(\alpha_k, \alpha_j) = 0.$$

这是因为由正交性，当 $k \neq j$ 时 $(\alpha_k, \alpha_j) = 0$，而由(44′)有 $c_{mj}(\alpha_j, \alpha_j) = (\gamma_m, \alpha_j)$. 根据归纳法假定，(44)式中 α_i ($i=1, \cdots, m-1$)表达式代入(44′)式中，有

$$\alpha_m = \gamma_m - \sum_{k<m} c_{mk}\alpha_k = \gamma_m - \sum_{k<m} c_{mk}\gamma_k + \sum_{j<k<m} c_{mk}d_{kj}\gamma_j.$$

这就证明了(44)式对于 m 也成立，其中

$$d_{mk} = c_{mk} - \sum_{k<j<m} c_{mj}d_{jk}.$$

因为 γ_m 与 $\gamma_1, \cdots, \gamma_{m-1}$ 线性无关，所以它不可能在 S 中，因此 $\alpha_m \neq 0$. 最后，$\gamma_1, \cdots, \gamma_m$ 和 $\alpha_1, \cdots, \alpha_m$ 两组矢量都张成由 S 和 γ_m 张成的子空间. 这就完成了引理 2 的证明.

定理 21 有限维欧几里得矢量空间 E 的每组标准正交矢量 $\gamma_1, \cdots, \gamma_m$ 是 E 的标准正交基的一部分.

证明 根据定理 6，$\gamma_1, \cdots, \gamma_m$ 是 E 的基底 $\gamma_1, \cdots, \gamma_n$ 的一部分. 这组基底可由引理 2 正交化，然后再设 $\beta_i = \frac{\alpha_i}{|\alpha_i|}$，使它标准化；而这个过程对原来的正交矢量 $\gamma_1, \cdots, \gamma_m$ 没有任何变化.

推论 任意有限维欧几里得矢量空间 E 有标准正交基.

格拉姆-施密特正交化方法还有其他涵义，例如，设 S 是欧几里得矢量空间 E 的任意 m 维子空间，如上所述，S 具有标准正交基 $\alpha_1, \cdots, \alpha_m$. 如果 γ 是不在 S 中的任意矢量，那么用上述正交化过程可以把 γ 表示成两个矢量的和 $\gamma = \alpha + \beta$，其中分量 β 是在 S 中，分量 α 与 S 的每个矢量垂直. 矢量 β 称为 γ 在 S 上的正（交）投影.

我们以确定已知(实)有限维矢量空间 V 上的全部内积来结束本节. 显然，如果 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 是 V 的任意一组基底，那么对任意矢

量 $\xi=x_1\alpha_1+\cdots+x_n\alpha_n$ 和 $\eta=y_1\alpha_1+\cdots+y_n\alpha_n$, 根据双线性我们有

$$(\xi,\eta)=\left(\sum_i x_i\alpha_i,\ \sum_k y_k\alpha_k\right)=\sum_{i,k}x_iy_k(\alpha_i,\alpha_k). \tag{45}$$

于是，任意两个矢量的内积通过 n^2 个实常数$(\alpha_i,\ \alpha_k)=a_{ik}$ 被确定为坐标 x_i 和 y_k 的某一个双线性型. 因为$(\alpha_i,\alpha_k)=(\alpha_k,\ \alpha_i)$，所以这个形式是对称的.

反过来，F^n 中任意对称双线性型$\sum\limits_{i,k} a_{ik}x_iy_k$ $(a_{ik}=a_{ki})$ 满足(38)和(39)式的前三个条件. 第四个条件表明二次型 $\sum a_{ik}x_ix_k$ 是"正定的"，也就是说，$\sum a_{ik}x_ix_k>0$，除非每个 $x_i=0$. 一个方阵是否正定的判别方法将在 § 9.9 中推导.

对于标准正交基，我们有$(\alpha_i,\alpha_k)=0$，当 $i\neq k$; $(\alpha_i,\alpha_i)=1$，因此(45)化为

$$(\xi,\eta)=\sum_{i=1}^{n}x_iy_i=x_1y_1+\cdots+x_ny_n. \tag{46}$$

由这个公式我们可以得出结论

定理 22 对于标准正交基，"抽象的"内积表现为"具体的"形式(46).

这样每个有限维欧几里得矢量空间就同构于某个 $\mathbf{R}^n$.

习　题

1. 对下列各组矢量张成的四维欧几里得矢量空间的子空间，求出标准正交基:

(a) (1, 1, 0, 0), (0, 1, 2, 0)和(0, 0, 3, 4);

(b) (2, 0, 0, 0), (1, 3, 3, 0)和(0, 4, 6, 1).

(提示: 先找出正交基，然后再标准化.)

2. 画图说明矢量在一维子空间上的正投影.

3. 求矢量 $\beta=(2,1,3)$ 在由 $\alpha=(1,0,1)$ 张成的子空间上的正投影.

4. 求 $\beta=(0,0,0,3)$ 在习题 1 中所述的每个子空间上的正投影.

5. 设 S 是欧几里得矢量空间 E 的任意子空间，证明：与 S 中每个矢量 ξ 正交的全体矢量的集合 $S^{\perp}$ 是满足下面条件的子空间：

$$S\cap S^{\perp}=\mathbf{0},\ S+S^{\perp}=E,\ \text{并且}\ d[S]+d[S^{\perp}]=d[E]$$

(子空间 $S^{\perp}$ 称为 S 的正交补空间.)

6. 在三维欧几里得矢量空间中，求出由 $(2,-1,-2)$ 张成的子空间的正交补空间的基底.

7. 求出习题 1 中所述的每个子空间的正交补空间的基底.

*8. (a) 列出 $\mathbf{Q}^3$ 中的非平凡子空间，它不包含任何长度为 1 的矢量.

(b) 对标量属于任意有序域的矢量空间，叙述并证明类似于引理 2 的命题.

§7.12 商 空 间

我们现在将要指出，§6.13 中的商群的构造方法容易推广到矢量空间中去. 设 V 是域 F 上任意矢量空间，并设 S 是 V 的任意子空间. 在加法运算之下，V 是一个交换群，而且 S 是 V 的一个(正规)子群. 因此我们可以构造加法商群 V/S.

例如，在欧几里得空间 $\mathbf{R}^3$ 中，设 S 是由单位矢量 $(0,1,0)$ 的全体倍数 $(0,y,0)$ 组成. 则对任意矢量 $\alpha=(a,b,c)$，陪集是由全体矢量 $(a,b+y,c)$ 组成，其中每个矢量与 α 有相同的 x 坐标 a 和相同的 z 坐标 c；它们是矢量 $(a,\cdot,c)$，这里的圆点位置是一个任意元素. 在商群 $\mathbf{R}^3/S$ 中，两个这样的矢量的和 $(a,\cdot,c)+(a',\cdot,c')$ 显然是 $(a+a',\cdot,c+c')$.

在这个例中，我们也可以用任意标量 $t\in\mathbf{R}$ 去乘每个矢量 $(a,\cdot,c)$ 而得到新的陪集 $(ta,\cdot,tc)$. 显然，在这些运算之下商群 $\mathbf{R}^3/S$ 是一个(实)矢量空间. 我们现在指出，类似的构造能够推广到一般情形.

已知域 F 上矢量空间 V，我们可以把 §6.13 的讨论移植到 V

上得到商空间 $V/S=X$. 回忆一下，对任意群 G 和(正规)子群 N，商群 G/N 的元素只不过是 N 在 G 中的陪集 xN. 因此，已知矢量空间 V 的一个子空间 S，每个矢量 $\alpha\in V$ 确定 S 的一个陪集，这个陪集定义为由所有和 $\alpha+\sigma$(对一切 $\sigma\in S$)组成的集合 $\alpha+S$. 例如，$\alpha=\alpha+\mathbf{0}$ 是这个陪集的一个矢量，称它是这个陪集的“代表元素”. 两个陪集 $\alpha+S$ 和 $\beta+S$ 相等(作为集合)当且仅当 $\alpha-\beta\in S$；当这个结论成立时，α 和 β 代表同一个陪集(是陪集的元素). 几何上，子空间 S 的不同陪集恰恰是 S 在平移之下的“平行子空间”.

我们定义两个陪集的和是一个陪集:

$$(\alpha+S)+(\beta+S)=(\alpha+\beta)+S,$$

同 §6.13 的引理 2 中所说的一样，这个和不依赖于代表元素 α 和 β 的选择. 下面定义陪集 $\alpha+S$ 用标量 c 乘而得到的积是陪集

$$c(\alpha+S)=c\alpha+S.$$

因为 $\alpha-\beta\in S$ 可推出 $c\alpha-c\beta\in S$，所以这个积也不依赖于已知陪集的代表元素的选择. 不难验证，这两个定义使得 S 在 V 中的所有陪集的集合 V/S 成为一个矢量空间，它称为 V 对于 S 的商空间. 此外，如果函数 P 由 $\alpha P=\alpha+S$ 定义，那么 P 是矢量空间的一个满同态，其同态核恰好是 S，值域是整个 V/S. 这个函数 P 称为 V 到它的商空间上的标准投影；于是我们证明了

定理 23 已知矢量空间 V 的任意子空间 S，则存在一个商空间 $X=V/S$ 和一个满同态 $P:V\to X$，同态核是 S，它的值域是 X.

习 题

1. 设 S 是空间 $\mathbf{R}^3$ 中的一维子空间，证明：S 的全体陪集是所有平行于 S 的直线.

2. 设 $V=F^3$，F 是任意域，S 是由 $(1, 1, 0)$ 和 $(1, 1, 1)$ 张成的子空间.

(a) 证明：两个矢量 (x, y, z) 和 (x', y', z') 在 S 的同一个陪集里当且

仅当 $x+y'=x'+y$.

(b) 当 $F=\mathbf{R}$,描述 S 和它的陪集的几何意义.

3. 证明: 如果 S 是 $V=F^n$ 中同构于 F^m 的一个子空间, 那么 V/S 与 F^{n-m} 同构.

4. 详细证明: 在正文所述运算之下, 矢量空间 V 的任意子空间 S 的全体陪集构成一个矢量空间.

5. 设 $V=\mathbf{R}[x]$ 是所有实多项式 $f(x)$ 构成的空间, 并设

$$\phi: f(x)\mapsto\frac{1}{2}[f(x)+f(-x)].$$

(a) 证明: ϕ 是矢量空间的同态.

(b) 描述它的核 S 和商空间 V/S.

*§7.13 线性函数与对偶空间

在初等代数中,有限维矢量空间 $V=F^n$ 的变矢量 $\xi=(x_1,\cdots,x_n)$ 的坐标 $x_1,\cdots,x_n$ 的(齐次)“线性函数”是特殊形式的多项式函数

$$f(\xi)=\xi f=c_1x_1+\cdots+c_nx_n=x_1c_1+\cdots+x_nc_n,\tag{47}$$

这里 $c_1,\cdots,c_n$ 是域 F 中的任意常数. 容易验证, 任意这样的函数 f 满足恒等式

$$(\xi+\eta)f=\xi f+\eta f,\quad (a\xi)f=a(\xi f)\tag{48}$$

其中 ξ,η 为 V 中任意矢量; a 为 F 中任意标量.

恒等式(48)与公式(47)的定义相比有两个优点: (i)(48)是函数内在的性质(即它们不依赖于 V 的基底的选择); (ii)(48)可用于无穷维矢量空间(例如用于函数空间). 因此, 我们把任意域 F 上任意矢量空间 V 上的线性函数 f 定义为满足两个恒等式(48)的从 V 到 F 的函数.

在第一个恒等式中取 $\eta=0$, 立即看出, $0f=0$. 这两个恒等式可推出组合恒等式

$$(a\xi+b\eta)f=a(\xi f)+b(\eta f),\quad \xi,\eta\in V,\quad a,b\in F \tag{49}$$

反过来，这个恒等式当取 $a=b=1$ 便给出(48)的第一个恒等式，因此 $0f=0$，并且当取 $b=0$ 时，得出(48)的第二个恒等式. 简单地说，线性函数 f 是保持线性组合性质的函数.

刚才定义的“线性函数”概念实质上等价于 §7.8 中引进的“坐标”概念，即定理 14 中的每个 x_i，当 ξ 在 V 上变化时，它是 ξ 的线性函数. 下面结果是定理 14 的对偶定理，在某种意义上，定理 14 更简短明确.

定理 24 如果 $\beta_1,\cdots,\beta_n$ 是 F 上矢量空间 V 的一组基底，$c_1,\cdots,c_n$ 是 F 中的 n 个常数，那么在 V 中有一个且仅有一个线性函数 f，使得 $\beta_i f=c_i$，$i=1,\cdots,n$. 这个函数由公式

$$(x_1\beta_1+\cdots+x_n\beta_n)f=x_1c_1+\cdots+x_nc_n \tag{50}$$

给出.

证明 对 n 用归纳法，对任意适合 $\beta_i f=c_i$ $(i=1,\cdots,n)$ 的线性函数 f，从(49)可直接推出方程(50). 反过来，对 V 的任意一组基底 $\beta_1,\cdots,\beta_n$，根据定理 14，每个 ξ 有唯一的表示 $\xi=x_1\beta_1+\cdots+x_n\beta_n$，因此对 F 中任意常数 $c_1,\cdots,c_n$，方程(50)定义一个单值函数. 这个函数是线性的，这因为对任意 ξ 和 $\eta=y_1\beta_1+\cdots+y_n\beta_n$，有

$$(a\xi+b\eta)f=\left[\sum(ax_i+by_i)\,\beta_i\right]f=\sum(ax_i+by_i)c_i$$

$$=a\sum x_ic_i+b\sum y_ic_i=a(\xi f)+b(\eta f),$$

因此条件(49)满足.

推论 F^n 上的线性函数是由线性表达式(47)给出的函数.

事实上，(47)式给出函数 f，它在 F^n 中单位矢量 ε_i 上取值 c_i. 于是每个线性函数由(47)中的 n 个系数 $(c_1,\cdots,c_n)$ 所确定；这就表示全体线性函数本身构成一个矢量空间.

对任意矢量空间 V，把两个线性函数 f 和 g 的和 $f+g$ 定义为

由方程

$$\xi(f+g)=\xi f+\xi g, \text{ 对一切 } \xi\in V \tag{51}$$

给出的函数，把线性函数 f 和标量 c 的乘积 cf 定义为由方程

$$\xi(fc)=(\xi f)c, \text{ 对一切 } \xi\in V, \ c\in F \tag{52}$$

给出的函数. 我们容易验证 $f+g$ 与 fc 仍是 V 上的线性函数.

定理 25 设 V 是 F 上的矢量空间，V^* 是 V 上所有线性函数的集合，那么 V^* 在由(51)和(52)定义的 $f+g$ 和 fc 两个运算之下也是 F 上的矢量空间.

这个 V 上线性函数矢量空间 V^* 称为 V 的对偶空间或 V 的共轭空间. 在现代数学中这是一个基本概念.

为证明定理，我们只须验证，对于运算 $f+g$ 与 fc，矢量空间的那些公理都成立. 例如，为了证明分配律 $(f+g)c=fc+gc$，我们注意，对任意 $\xi\in V$，根据定义(51)和(52)以及 V 中的分配律，有

$$\begin{aligned}\xi[(f+g)c]&=[\xi(f+g)]c=[\xi f+\xi g]c\\&=(\xi f)c+(\xi g)c=\xi(fc)+\xi(gc)\\&=\xi(fc+gc).\end{aligned} \tag{53}$$

这个方程表明，函数 $(f+g)c$ 和 $fc+gc$ 对任意自变量 ξ 都有相同的值，因此它们一定相等. 其他公理的证明类似.

推论 1 如果矢量空间 V 有一组有限基底 $\beta_1,\cdots,\beta_n$，那么它的对偶空间 V^* 有一组基底，这组基底是由 $(x_1\beta_1+\cdots+x_n\beta_n)f_i=x_i$ $(i=1,\cdots,n)$ 定义的 n 个线性函数 $f_1,\cdots,f_n$ 组成. 这 n 个线性函数由公式

$$\beta_i f_j=\begin{cases}0, & \text{当 } i\neq j,\\ 1, & \text{当 } i=j,\end{cases} \quad i,j=1,\cdots,n \tag{54}$$

唯一确定.

证明 对于 n 个已知标量 $c_1,\cdots,c_n$，线性组合 $f_1c_1+\cdots+f_nc_n$ 是一个线性函数；根据(54)，它在任意基矢量 β_i 上的值是

$$\beta_i\left(\sum_j f_j c_j\right)=\sum_j \beta_i f_j c_j = c_i.$$

我们可以推出函数 f_1, …, f_n 在 V^* 中线性无关，这因为如果 $f=f_1c_1+\cdots+f_nc_n=\mathbf{0}$，那么对每个 i，$\beta_i f=0$，因此 $c_1=c_2=\cdots=c_n=0$. 还可以推出 n 个线性函数 f_1, …, f_n 张成空间 V^*: 根据定理 24, 任意线性函数 f 是由它的值 $\beta_i f=c_i$ 所确定的，因此 f 等于以这些 c_i 值为系数而构成的线性组合 $\sum_j f_j c_j$.

这组基底 $f_1, \cdots, f_n$ 称为已知基底 $\beta_1, \cdots, \beta_n$ 的对偶基.

推论 2 n 维矢量空间 V 的对偶空间 V^* 的维数同 V 一样，也是 n.

把 V 的每个矢量 $\Sigma x_i\beta_i$ 映到 V^* 的函数 $\Sigma f_i c_i$ 的变换 $T: V\to V^*$ 是 V 到 V^* 上的同构; 然而，这个同构依赖于 V 的基底的选择.

设 ξ 是 V 中矢量，f 是对偶空间 V^* 的矢量，我们也可以把 f 在自变量 ξ 上的值写成对称的"内积"记号 $\xi f=(\xi, f)$. 那么方程(49)变成

$$(a\xi+b\eta, f)=a(\xi, f)+b(\eta, f). \tag{55}$$

而加法和数乘的定义(51)和(52)变成

$$(\xi, fc+gd)=(\xi, f)c+(\xi, g)d. \tag{56}$$

这两个方程的类似暗示了另外一种解释. 在(ξ, f)中，保持 ξ 固定，而让 f 变化. 那么，由(56)，ξ 确定 f 的一个线性函数，并且由(55)，这些函数上的矢量运算恰恰对应于原来矢量 ξ 上的矢量运算.

正式地，V 中每个矢量 ξ 确定对偶空间 V^* 上的一个函数 F_ξ，它由 $F_\xi(f)=(\xi, f)$来定义. 那么(56)表明 F_ξ 是线性函数.

定理 26 任意有限维矢量空间 V，在下述对应下与它的二次共轭空间$(V^*)^*$同构，这个对应把每个矢量 $\xi\in V$ 映射到由 $F_\xi(f)$

$=\xi f$ 定义的函数 F_ξ 上.

证明 根据 (55) 式, 对应 $\tau:\xi\mapsto F_\xi$ 保持矢量加法和数乘运算. 我们现在证明 τ 是一对一的, 因而是一个同构. 如果 $\xi\neq\eta$, 那么 $\zeta=\xi-\eta\neq 0$, 于是 ζ 是 V 的基底的一部分. 因此, 根据定理 24, 在 V^* 中存在满足 $\zeta f_0=1\neq 0$ 的一个线性函数 f_0, 使得

$$F_\xi(f_0)=F_\eta(f_0)+F_\zeta(f_0)=F_\eta(f_0)+1\neq F_\eta(f_0).$$

这就证明了 τ 是一一的, 因此它是 V 到 $(V^*)^*$ 的同构. 可是由定理 25 的推论 2, V 和 $(V^*)^*$ 的维数相同, 因此 τ 是映上的. 证毕

这个同构 $\xi\mapsto F_\xi$, 同由推论 2 蕴含的 V 和 V^* 之间的同构不一样, 它是“自然的”, 因为它的定义不依赖于 V 的基底的选择.

设 S 是 V 的任意子空间, S' 是 V^* 中所有满足 $(\sigma,f)=0$(对每个 $\sigma\in S$) 的那些线性函数 f 所组成的集合, 我们把集合 S' 同子空间 S 联系起来. 称 S' 是 S 的零化子. 显然它是 V^* 的子空间, 这因为由 $(\sigma,f)=0$ 和 $(\sigma,g)=0$ 可推出 $(\sigma,fc+gd)=0$. V 的子空间和它们在 V^* 中的零化子之间的对应 $S\to S'$ 具有性质

$$\text{若 } S\subset T \text{ 可推出 } S'\supset T' \qquad (57)$$

(包含关系是反的), 这因为如果 $f\in T'$, 那么对 T 中每个 σ 有 $(\sigma,f)=0$, 因此对每个 $\sigma\in S\subset T$ 也有 $(\sigma,f)=0$. 仅有 $\mathbf{0}$ 一个元素组成的子空间的零化子是整个对偶空间 V^*, V 的零化子是 V^* 中仅有零函数组成的子空间.

由对偶性, 设 R 是共轭空间 V^* 的子空间, R' 是 V 中由所有满足 $(\xi,f)=0$(对每个 $f\in R$) 的 ξ 组成的子空间, 则每个 R 确定一个 R' 作为它的零化子.

定理 27 *如果 S 是 n 维矢量空间 V 中的 k 维子空间, 那么把 S 零化的所有线性函数 f 组成的集合 S' 是 V^* 的 $n-k$ 维子空间.*

证明 选取 S 的一组基底 $\beta_1,\cdots,\beta_k$, 并根据定理 6 把它扩张成 V 的一组基底 $\beta_1,\cdots,\beta_n$. 在 V^* 的对偶基 $f_1,\cdots,f_n$ 中, 函数

$f_1c_1+\cdots+f_nc_n$ 对于 S 的所有矢量都为零当且仅当它对于每个 β_1, $\cdots$, β_k 为零，也就是说，当且仅当 $c_1=\cdots=c_k=0$. 这恰好意味着 $n-k$ 个函数 $f_{k+1},\cdots,f_k$ 构成 S 的零化子 S' 的一组基底.

定理 27 恰是关于齐次线性方程组线性无关解的个数的定理 13 的重述.

子空间到它的零化子之间的对应 $S\mapsto S'$ 引出 n 维射影几何的对偶原理，在这方面，下面的性质是基本的.

定理 28 对应 $S\mapsto S'$ 满足

$$(S')'=S,\quad (S+T)'=S'\cap T',\quad (S\cap T)'=S'+T'. \qquad (58)$$

证明 因为对 S 中一切 ξ 和 S' 中一切 f, 有 $(\xi, f)=0$, 所以 S 中每个 ξ 零化 S' 中每个矢量 f, 因此 $\xi\in(S')'$, 于是 $(S')'\supset S$. 但是根据定理 27, $(S')'$ 的维数等于 $n-(n-k)=k=d[S]$; 因此 $(S')'\supset S$ 是不可能的，必有 $(S')'=S$.

这个关系表明，子空间到它的零化子的对应 $S\mapsto S'$, 当作用两次时就是恒等对应; 因此这个对应有逆并且是一一映上. 因为根据(57)它也是相反的包含关系，所以我们推出，它把包含 S 和 T 的最小子空间 $S+T$ 映射到包含在 S' 和 T' 中的最大子空间 $S'\cap T'$. 并由对偶性得到 $(S\cap T)'=S'+T'$.

推论 1 设 $L(V)$ 是域上有限维矢量空间 V 的所有子空间组成的集合. 存在一个 $L(V)$ 到自身的一一对应，这个对应使包含关系相反并且满足(58).

证明 设 V 中选取任意一组固定基底 $\beta_1,\cdots,\beta_n$. 对 V 的任意子空间 S, 设 S' 是所有满足下面条件的矢量 $\eta=y_1\beta_1+\cdots+y_n\beta_n$ 组成的集合:

$$x_1y_1+\cdots+x_ny_n=0, \text{对 } S \text{ 中一切 } \xi=(x_1\beta_1+\cdots+x_n\beta_n). \qquad (59)$$

我们重复一下证明定理 27 和(58)式时用过的论证，就可以得出所需要的结果.

注 1 在有限维欧几里得矢量空间 E 的情形，存在一个从 E 到它的对偶空间 E^* 的自然同构，它可以通过内蕴内积 (ξ, η) 来定义. 对每个矢量 $\eta \in E$, 公式 $\xi f_\eta = (\xi, \eta)$ 定义了一个 E 上的函数 f_η, 因为 (ξ, η) 是双线性的, 所以 f_η 是线性的. 容易证明, 对应 $\eta \mapsto f_\eta$ 是 E 到 E^* 上的同构.

注 2 对于无穷维矢量空间 V, V 到 V^* 的同构一般来说并不存在. 例如, 设 V 是所有序列 $\xi = (x_1, \cdots, x_n, \cdots)$ 组成的矢量空间, 其中各分量 $x_n \in F$, 并且只有有限多个非零元素, 加法和乘法是逐项进行. V 上任意线性函数仍然可以表示成形式 $\xi f = \sum x_i c_i$, 其中的系数是任意无穷序列 $\gamma = (c_1, c_2, \cdots, c_n, \cdots)$. 因此对偶空间 V^* 是由所有这样的无穷序列组成. 空间 V 和 V^* 不同构. 例如, 我们借助于更新的概念, 如果 F 是可数域, 那么 V 是可数的, 但 V^* 却是不可数的.

习　题

1. 完成定理 25 的证明.

2. 设 $f_1, \cdots, f_n$ 是 n 维矢量空间 V 上 n 个线性无关的线性函数, $c_1, \cdots, c_n$ 是已知常数. 证明: V 中存在一个且只存在一个满足 $\xi f_i = c_i (i = 1, \cdots, n)$ 的矢量 ξ. 利用非齐次线性方程组加以解释.

3. (a) 完成注 1 的证明.

   (b) 指出注 1 与定理 25 推论 1 的联系.

4. 在 $\mathbf{C}^4$ 中定义 $(\xi, \eta) = x_1y_2 - y_1x_2 + x_3y_4 - y_3x_4$, 对每个子空间 S, 定义 S' 为所有满足 $(\xi, \eta) = 0$ (对一切 $\xi \in S$) 的矢量 η 组成的集合. 证明: (57) 和 (58) 成立. 并证明: 如果 S 是一维空间, 那么 $S \subset S'$.

第八章　矩 阵 代 数

§8.1　线性变换与矩阵

有很多方法可以把一个平面线性地映射到自身，也就是说，使得矢量的任意线性组合被映射到变换了的矢量的同一线性组合. 用符号表示这就是

$$(c\xi+d\eta)T=c(\xi T)+d(\eta T). \tag{1}$$

与此等价的说法是，T 按下述意义保持加法与数乘:

$$(\xi+\eta)T=\xi T+\eta T,\quad (c\xi)T=c(\xi T). \tag{2}$$

例如，考虑平面围绕原点转过 θ 角的(反时针) 刚体旋转 R_θ. 在几何上，显然 R_θ 把以 ξ 和 η 为边的平行四边形对角线 $\xi+\eta$ 变换到以 ξR_θ 和 ηR_θ 为边的平行四边形对角线 $\xi R_\theta+\eta R_\theta$. 用图 1 加以说明，在图中 $\theta=135°$，并可看出 $(\xi+\eta)R_\theta=\xi R_\theta+\eta R_\theta$. 还有，如果 c 是任意实标量，则 ξ 的倍数 $c\xi$ 旋转到 $c(\xi R_\theta)$，于是 $(c\xi)R_\theta=c(\xi R_\theta)$. 因此平面的任意刚体旋转都是线性的. 此外，对于空间围绕任一轴的旋转，可做同样的考虑.

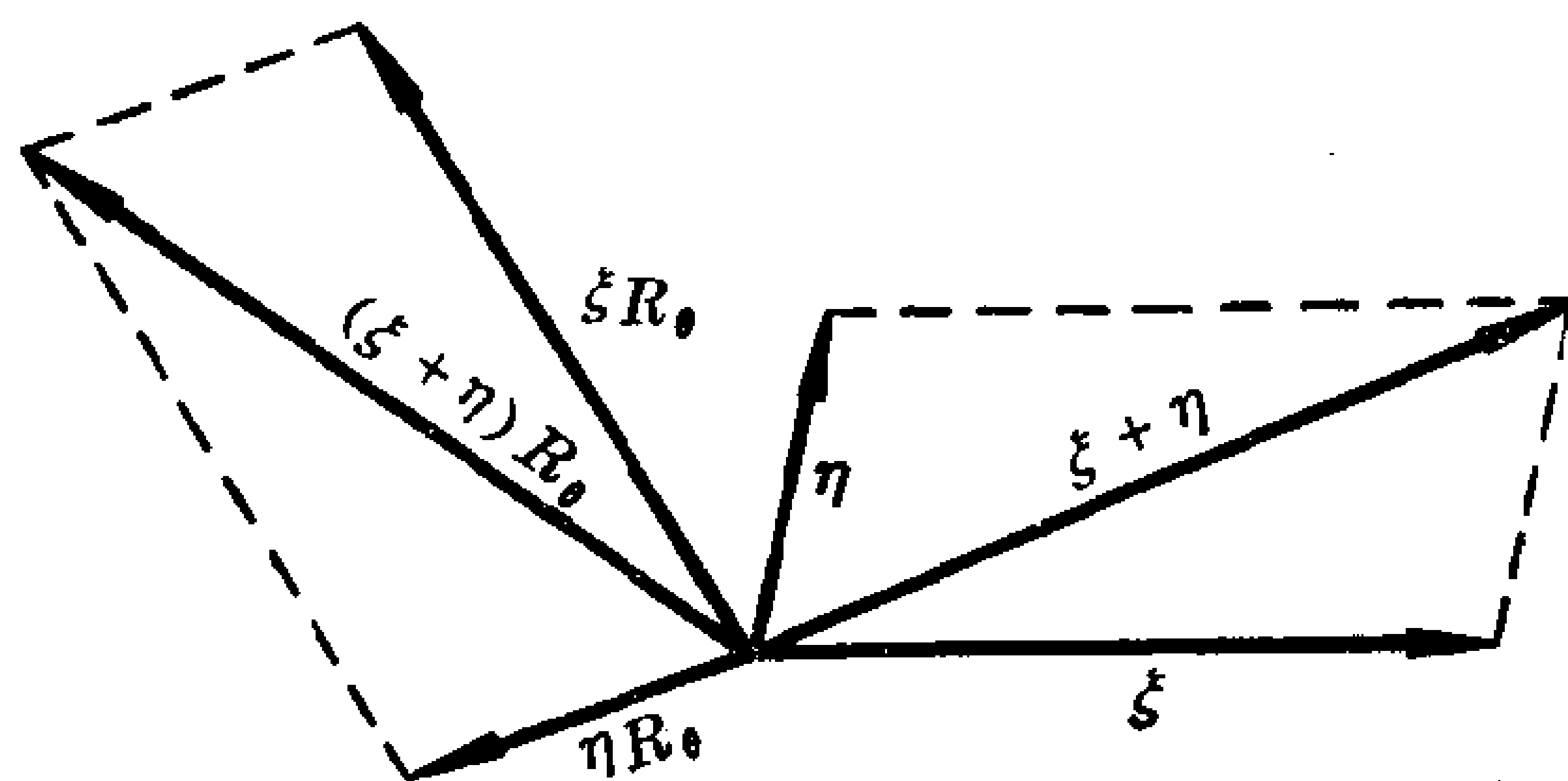


图　1

再有，考虑平面离开原点的简单扩展 D_k，在这个扩展下，平面上每个点沿径向移动到一个位置，这个位置到原点的距离是原距

离的 k 倍，用符号表示，我们有

$$\xi D_k = k\xi, \qquad \text{对一切 } \xi. \tag{3}$$

这个变换又把平行四边形变为平行四边形，因此矢量和变为矢量和，所以 $(\xi+\eta)D_k=\xi D_k+\eta D_k$. 此外，$(c\xi)D_k=kc\xi=ck\xi=c(\xi D_k)$；因此 D_k 是线性的. 注意，如果 $0<k<1$，那么公式(3)定义了一个朝向原点的简单压缩；如果 $k=-1$，那么公式(3)定义了一个关于原点的反射(通过 180° 的旋转)，所以这些变换也都是线性的.

在任意有限维矢量空间 F^n 中存在类似的变换. 比如，设 T 是 $\mathbf{R}^3$ 的变换，它把每个矢量 $\xi=(x_1, x_2, x_3)$ 变到矢量 $\eta=(y_1, y_2, y_3)$，η 的坐标由 ξ 的坐标 x_1, x_2, x_3 的齐次线性函数给出：

$$\begin{aligned} y_1 &= a_1x_1+b_1x_2+c_1x_3, \\ y_2 &= a_2x_1+b_2x_2+c_2x_3, \\ y_3 &= a_3x_1+b_3x_2+c_3x_3. \end{aligned} \tag{4}$$

显然，如果所有 x_i 都乘上同一个常数 d，那么(4)中的所有 y_i 也同样乘上常数 d，所以 $(d\xi)T=d\eta=d(\xi T)$. 同样，矢量 ξ 与 $\xi'=(x_1', x_2', x_3')$ 的和 $\xi+\xi'=(x_1+x_1', x_2+x_2', x_3+x_3')$ 的变换式 ζ，可以由(4)计算出它的坐标为

$$\begin{aligned} z_j &= a_j(x_1+x_1')+b_j(x_2+x_2')+c_j(x_3+x_3') \\ &= (a_jx_1+b_jx_2+c_jx_3)+(a_jx_1'+b_jx_2'+c_jx_3'), \end{aligned}$$

其中 $j=1, 2, 3$. 这些 z_j 恰好等于 y_i+y_i'，这里 y_i 由(4)式给出，而 y_i' 相应于(4)的表示. 这就是说，$(\xi+\xi')T=\xi T+\xi' T$.

反过来，在 $\mathbf{R}^3$ 上任意到自身的线性变换具有形式(4). 为得到这个结论，分别用

$$\alpha=(a_1, a_2, a_3), \quad \beta=(b_1, b_2, b_3), \quad \gamma=(c_1, c_2, c_3)$$

表示单位矢量

$$\varepsilon_1=(1, 0, 0), \quad \varepsilon_2=(0, 1, 0), \quad \varepsilon_3=(0, 0, 1)$$

的变换式，那么变换 T 一定把 $\mathbf{R}^3$ 中每个矢量 $\xi=(x_1, x_2, x_3)$ 变到

$$\eta=\xi T=(x_1\varepsilon_1+x_2\varepsilon_2+x_3\varepsilon_3)T$$
$$=x_1(\varepsilon_1T)+x_2(\varepsilon_2T)+x_3(\varepsilon_3T)$$
$$=x_1\alpha+x_2\beta+x_3\gamma$$
$$=(x_1a_1+x_2b_1+x_3c_1,x_1a_2+x_2b_2+x_3c_2,x_1a_3+x_2b_3+x_3c_3).$$

因此，如果T是线性的，那么它就具有形式(4).

前面的构造明显地给出(4)的系数. 比如，考虑围绕原点转过θ角的反时针旋转R_θ. 根据正弦函数和余弦函数的定义，我们得到，单位矢量$\varepsilon_1=(1,\ 0)$旋转到$(\cos\theta,\ \sin\theta)$，而单位矢量$\varepsilon_2=(0,1)$旋转到

$$\left(\cos\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right),\ \sin\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right)\right)=(-\sin\theta,\ \cos\theta).$$

这样，在(4)中我们有$a=\cos\theta$，$b=\sin\theta$，$a^*=-\sin\theta$，$b^*=\cos\theta$，所以R_θ的方程是

$$R_\theta:\ x'=x\cos\theta-y\sin\theta,\ \ y'=x\sin\theta+y\cos\theta. \qquad (5)$$

同样，关于通过原点并与x轴交成α角的直线的反射F_α，它把极坐标是(r,θ)的点变换到极坐标是$(r,\ 2\alpha-\theta)$的点. 因此，变换F_α的效果可用

$$F_\alpha:\ x'=x\cos2\alpha+y\sin2\alpha, \qquad (5')$$
$$y'=x\sin2\alpha-y\cos2\alpha$$

表示.

关于线性的概念还可以更一般地应用到同一域上任意两个矢量空间之间的变换.

定义 V和W是同一域F上的矢量空间，变换$T:V\to W$如果对V中一切矢量ξ和η，对F中一切标量c和d，有

$$(c\xi+d\eta)T=c(\xi T)+d(\eta T),$$

那么称T为线性变换。

例如，考虑变换

$$T_1:(x, y)\mapsto(x+y, x-y, 2x)=(x', y', z') \tag{6}$$

它是由方程 $x'=x+y, y'=x-y, z'=2x$ 定义的. 这个变换把平面矢量 (1, 0) 和 (0, 1) 分别变换到空间中的正交矢量 (1, 1, 2) 和 (1, −1, 0)，并把平面线性地变换到空间的一个子集合.

用下面的原理处理有限维情况更为方便.

定理 1 如果 $\beta_1, \cdots, \beta_m$ 是矢量空间 V 的任意一组基底，$\alpha_1, \cdots, \alpha_m$ 是矢量空间 W 的任意 m 个矢量，那么存在唯一的线性变换 $T: V\to W$，使得 $\beta_1 T=\alpha_1, \cdots, \beta_m T=\alpha_m$. 这个变换是通过

$$(x_1\beta_1+\cdots+x_m\beta_m)T=x_1\alpha_1+\cdots+x_m\alpha_m \tag{7}$$

来定义的.

例如，在平面上，设 $\beta_1=(1, 0)$，$\beta_2=(0, 1)$，$\alpha_1=(1, 0)$，$\alpha_2=(a, 1)$. 那么定理 1 断言，水平切变换

$$S_a:(x, y)\mapsto(x+ay, y) \tag{8}$$

是线性变换，并且是满足条件 $\beta_1 S_a=\alpha_1$，$\beta_2 S_a=\alpha_2$ 的唯一的线性变换. 几何上，图形上的每一点都沿 x 轴方向平行移动，所通过的距离与这一点在 x 轴上面的高度成正比. 这个变换把其边平行于轴的矩形变换成平行四边形. (见图 2, 可以把它想象成一叠纸牌!)

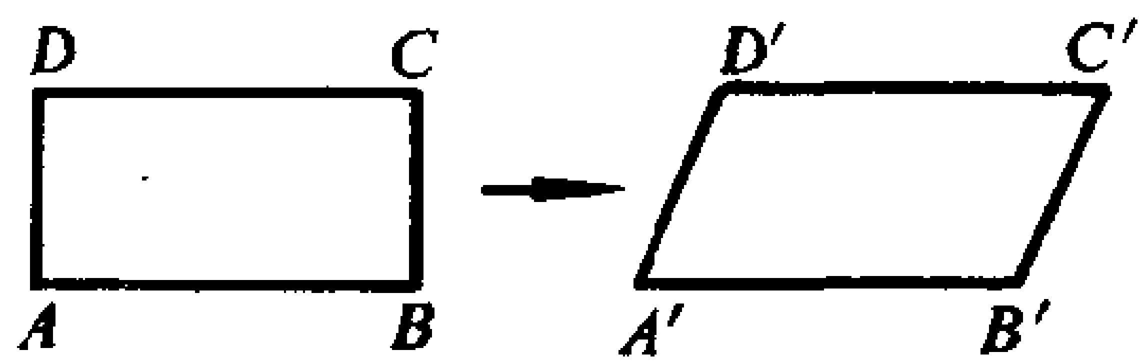


图 2

证明 如果 T 是线性变换，并且 $\beta_i T=\alpha_i (i=1, \cdots, m)$，那么由定义(1)和归纳法得到公式(7)的明显形式. 另一方面，因为 V 中每个矢量可以唯一地表示为 $x_1\beta_1+\cdots+x_m\beta_m$，所以公式 (7)定义了一个 V 到 W 的单值变换 T; 因此不可能存在另外的 V 到 W 的线性变换，使 $\beta_i T=\alpha_i$. 为了证明 T 是线性的，设 $\eta=\Sigma y_i\beta_i$ 是 V 中第二个矢量，那么，

$$(c\xi+d\eta)T=\left[\sum_{i=1}^{m}cx_i\beta_i+\sum_{i=1}^{m}dy_i\beta_i\right]T$$
$$=\left[\sum_{i=1}^{m}(cx_i+dy_i)\beta_i\right]T=\sum_{i=1}^{m}(cx_i+dy_i)\alpha_i$$
$$=c\sum_{i=1}^{m}x_i\alpha_i+d\sum_{i=1}^{m}y_i\alpha_i=c(\xi T)+d(\eta T).$$

因此 T 是线性变换. 证毕

如果 $V=F^m$, $W=F^n$, 并设 $\beta_1,\cdots,\beta_m$ 是 V_m 的单位矢量 $\varepsilon_1=(1,0,\cdots,0),\cdots,\varepsilon_m=(0,0,\cdots,1)$, 我们得到定理 1 的一个非常重要的应用. 在这种情形, 我们可以给出每个 α_i 的坐标表示

$$\begin{aligned}&\varepsilon_1T=\alpha_1=(a_{11},\ a_{12},\cdots,a_{1n}),\\&\varepsilon_2T=\alpha_2=(a_{21},\ a_{22},\cdots,a_{2n}),\\&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\&\varepsilon_mT=\alpha_m=(a_{m1},a_{m2},\cdots,a_{mn}).\end{aligned}\qquad(9)$$

定理 1 指出, 刚好存在一个同公式(9)相联系的线性变换. 于是, 这个变换是由 $m\times n$ 矩阵 $A=(a_{ij})$ 确定的, 矩阵 A 的第 i 行是一组坐标 $(a_{i1},\cdots,a_{in})$, a_{ij} 是矩阵第 i 行第 j 列上的元素. 这样我们就证明了

定理 2 *线性变换 $T:F^m\to F^n$ 和域 F 上的 $m\times n$ 矩阵 A 之间存在一个一一对应. 当给定变换 T, 相对应的矩阵 A 的第 i 行是由 ε_iT 的坐标组成; 当给定矩阵 $A=(a_{ij})$, T 就是把 F^m 的每个单位矢量 ε_i 变换到 A 的第 i 行 $(a_{i1},\cdots,a_{in})$ 的唯一的线性变换.*

我们用 T_A 表示 F^m 到 F^n 的按上述方式与 A 相对应的线性变换. 例如, 在平面上, (5)式表示的旋转变换, (3)式表示的相似变换, 和(8)式表示的切变换它们分别对应于下列矩阵

$$R_\theta\to\begin{pmatrix}\cos\theta&\sin\theta\\-\sin\theta&\cos\theta\end{pmatrix},$$

$$D_k\to\begin{pmatrix}k & 0\\ 0 & k\end{pmatrix},\qquad S_a\to\begin{pmatrix}1 & 0\\ a & 1\end{pmatrix}.$$

(9) 式表示的一般变换 $T=T_A$ 把 F^m 的任意已知矢量 $\xi=(x_1,\cdots,x_m)=x_1\varepsilon_1+\cdots+x_m\varepsilon_m$ 变换到 $W=F^n$ 中的矢量

$$\begin{aligned}\xi T&=x_1\alpha_1+\cdots+x_m\alpha_m\\ &=x_1(a_{11},\cdots,a_{1n})+\cdots+x_m(a_{m1},\cdots,a_{mn})\\ &=(x_1a_{11}+\cdots+x_ma_{m1},\cdots,x_1a_{1n}+\cdots+x_ma_{mn}).\end{aligned}$$

因此，如果 $(y_1,\cdots,y_n)$ 是变换了的矢量 $\eta=\xi T$ 的坐标，那么利用这些坐标通过一组齐次线性方程给出 T：

$$\begin{aligned}y_1&=x_1a_{11}+x_2a_{21}+\cdots+x_ma_{m1}=\sum_i x_ia_{i1},\\ y_2&=x_1a_{12}+x_2a_{22}+\cdots+x_ma_{m2}=\sum_i x_ia_{i2},\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ y_n&=x_1a_{1n}+x_2a_{2n}+\cdots+x_ma_{mn}=\sum_i x_ia_{in}.\end{aligned}\tag{10}$$

因此我们有

推论 从 F^m 到 F^n 的任意线性变换 T 可以用形为 (10) 的一组齐次线性方程来描述. 特别是，每个 T 确定一个 $m\times n$ 矩阵 $A=(a_{ij})$，使得 T 把坐标为 x_1，…，x_n 的矢量 ξ 变换到坐标为 $y_1,\cdots,y_n$ 的矢量 $\eta=\xi T$，其中 $y_1,\cdots,y_n$ 由 (10) 给出. 反过来，每个 $m\times n$ 矩阵 A 通过方程 (10) 确定一个线性变换 $T=T_A:F^m\to F^n$.

注意，(10) 的系数长方阵列并不是 (9) 中出现的矩阵 A，它是 (9) 式中行与列对换后的矩阵. (10) 的系数构成的 $n\times m$ 矩阵，它是从 $m\times n$ 矩阵 A 通过行与列对换而得到的，称为 A 的转置，并用 A^τ 来表示. 如果 $A=(a_{ij})$ 的第 i 行第 j 列元素为 a_{ij}，那么矩阵 A 的转置 $B=A^\tau$ 是通过关系

$$b_{ij}=a^\tau_{ij}=a_{ji}\quad(i=1,\cdots,n;\ j=1,\cdots,m)\tag{11}$$

形式地定义. 按照这种记号,把(10)换成更熟悉的形式

$$\begin{aligned} &b_{11}x_1+b_{12}x_2+\cdots+b_{1m}x_m=y_1,\\ &b_{21}x_1+b_{22}x_2+\cdots+b_{2m}x_m=y_2,\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ &b_{n1}x_1+b_{n2}x_2+\cdots+b_{nm}x_m=y_m. \end{aligned} \tag{11'}$$

上述线性变换公式涉及到全体 m- 数组的空间 F^m 和全体 n- 数组的空间 F^n. 更一般地, 如果 V 和 W 是 F 上任意两个有限维矢量空间, V 是 m 维的, W 是 n 维的, 当我们选取 V 的基底 $\beta_1, \cdots, \beta_m$ 和 W 的基底 $\gamma_1, \cdots, \gamma_n$ 之后, 那么任意线性变换 $T:V\to W$ 可以用矩阵 A 表示. 由于 T 是由象 $\beta_i T=\sum_j a_{ij}\gamma_j$ 确定的, 所以我们说 T 是由对于已知基底的这些系数组成的 $m\times n$ 矩阵 $A=(a_{ij})$ 来表示. 这相当于, 在同构 $\sum x_i\beta_i\mapsto(x_1, \cdots, x_m)$, $\sum y_j\gamma_j\mapsto(y_1, \cdots, y_n)$ 之下, 用 m- 数组空间和 n- 数组空间分别代替空间 V 和空间 W.

习　题

1. 描述下列各线性变换的几何意义:

(a) $y'=x, x'=y$;

(b) $y'=x, x'=x$;

(c) $y'=x, x'=0$;

(d) $y'=ky, x'=kx+kay$;

(e) $y'=by, x'=cx$.

2. 考虑平面到自身的变换, 这些变换是按下面叙述的方式把每个点 P 变换到与 P 有关的点 P'. 确定什么时候变换是线性的, 并求出它的变换方程.

(a) P' 在 P 的右方两个单位, 在 P 的上方一个单位(平移).

(b) P' 是 P 在过原点斜率为 $\frac{1}{2}$ 的直线上的投影.

(c) P' 在连结 P 到原点的半直线 OP 上, P' 到 O 的距离满足 $\overline{OP'}=$

$\dfrac{4}{\overline{OP}}$.

(d) 把 P 围绕原点旋转 30° 角，接着再平行于 y 轴做切变换，最后得到 P'.

(e) P' 是 P 关于直线 $x=3$ 的反射.

3. 求一矩阵，表示顶点为 $(1,0)$ 和 $\left(-\dfrac{1}{2}, \pm\dfrac{\sqrt{3}}{2}\right)$ 的等边三角形的对称.

4. 描述下列空间线性变换的几何意义.

(a) $x'=ax, y'=by, z'=cz$;

(b) $x'=0, y'=3y, z'=3z$;

(c) $x'=x+2y+5z, y'=y, z'=z$;

(d) $x'=x-y, y'=x+y, z'=4z$.

5. 正文中(6)式的变换矩阵是什么?

6. 求出下列所描述的线性变换的矩阵:

(a) $(1,1)\mapsto(0,1), (-1,1)\mapsto(3,2)$;

(b) $(1,0)\mapsto(4,0), (0,1)\mapsto(-1,2)$;

(c) $(2,3)\mapsto(1,0), (3,2)\mapsto(1,-1)$;

(d) $(1,0,0)\mapsto(1,2,1), (0,1,0)\mapsto(3,1,1), (0,0,1)\mapsto(0,0,3)$.

7. V 的子空间 S 在线性变换 T 之下的象，指的是对 S 中一切 ξ 所有矢量 ξT 构成的集合 $(S)T$. 证明 $(S)T$ 是一个子空间.

8. 一个线性变换 T 把 $(1,1)$ 变到 $(0,1,2)$，把 $(-1,1)$ 变到 $(2,1,0)$. 表示 T 的矩阵是什么?

§8.2 矩阵加法

线性变换(矩阵)的代数包含三种运算：两个线性变换(矩阵)的加法，线性变换与标量的乘法(数乘)，及两个线性变换(矩阵)的乘法. 我们现在定义矩阵的“矢量”运算，即两个矩阵的加法，及矩阵与标量的乘法.

两个 $m\times n$ 矩阵 $A=(a_{ij})$ 与 $B=(b_{ij})$ 的和 $A+B$ 是通过相应元素相加而得到的，表示为

$$(a_{ij})+(b_{ij})=(a_{ij}+b_{ij}). \tag{12}$$

这个和遵循通常的交换律和结合律，因为矩阵的每个元素遵循这两个定律. 在这个加法运算之下，所有元素为零的 $m\times n$ 矩阵 O 作为零矩阵，所以

$$O+A=A+O=A,\ \text{对一切}\ m\times n\text{矩阵}\ A.$$

矩阵的加法逆可以通过对每个元素简单地乘以 -1 而得到. 于是，在加法运算之下，全体 $m\times n$ 矩阵构成阿贝耳群.

矩阵 A 与标量 c 的"数乘"积 cA 是通过对矩阵的每个元素乘以 c 而得到的. 我们可以验证普通矢量定律:

$$\begin{aligned} 1\cdot A&=A, & c(dA)&=(cd)A,\\ (c+d)A&=cA+dA, & c(A+B)&=cA+cB. \end{aligned}\tag{13}$$

定理 3 *在加法和数乘运算之下，域 F 上的所有 $m\times n$ 矩阵构成一个 F 上的矢量空间.*

任意矩阵 (a_{ij}) 可以写成和 $\sum a_{ij}E_{ij}$，其中 E_{ij} 是一个特殊矩阵，它的第 i 行第 j 列元素为 1，其余元素都为 0. 这些矩阵 E_{ij} 是线性无关的，所以它们构成所有 $m\times n$ 矩阵的空间的一组基底. 因此这个空间的维数是 mn.

存在相应的线性变换的代数. 设 T 和 U 是从矢量空间 V 到矢量空间 W 的任意两个线性变换，我们可以通过

$$\xi(T+U)=\xi T+\xi U,\ \text{对}\ V\ \text{中一切}\ \xi\tag{14}$$

来定义和 $T+U$. 类似地，"数乘"积 cT 通过 $\xi(cT)=c(\xi T)$ 来定义. 根据定义(1)，线性变换之和 $T+U$ 是线性变换，这因为

$$\begin{aligned}(c\xi+d\eta)(T+U)&=(c\xi+d\eta)T+(c\xi+d\eta)U\\ &=c\xi T+c\xi U+d\eta T+d\eta U\\ &=c\xi(T+U)+d\eta(T+U).\end{aligned}$$

"数乘"积 cT 也是线性变换.

当 $V=F^m$, $W=F^n$，由定义(14)推出 $\varepsilon_i(T+U)=\varepsilon_iT+\varepsilon_iU$，因

此按定理 2 那样，与线性变换 $T+U$ 对应的矩阵 C 是与 T 和 U 对应的两个矩阵的和. 因为 $\varepsilon_i(cT)=c(\varepsilon_i T)$，所以刚刚定义的线性变换数乘运算对应于前面定义的 $m\times n$ 矩阵的数乘运算. 按照定理 2 下面引进的记号，这就是

$$T_{A+B}=T_A+T_B \quad 和 \quad T_{cA}=cT_A. \tag{15}$$

这种新定义具有本质的优越性，就是说，这些定义与 V 和 W 中所用的坐标系无关(参看 § 7.8). 它们还可以应用到无穷维矢量空间.

最后，应当看出，矢量空间 V 到矢量空间 W 的线性变换恰好是 V 到 W 的同态 (V 和 W 都看作是阿贝耳群)，它们同样保持数乘运算. 由于这个原因，所有从 V 到 W 的线性变换构成的矢量空间常常记作 $\mathrm{Hom}(V, W)$.

习　题

1. 对 § 8.1 的矩阵 R_θ, D_k, S_a，计算 $2R_\theta+D_k$，$2S_a-3D_k$ 和 $R_\theta-S_a+5D_k$.

2. 证明：$(A+B)^T=A^T+B^T$，$(cA)^T=cA^T$.

3. 证明法则(13).

4. 不借助于矩阵直接证明：所有线性变换 $T:V\to W$ 的集合，在(14)式和它下面所定义的加法及数乘运算之下是一个矢量空间.

§ 8.3　矩阵乘法

两个线性变换 T 和 U 的最重要的结合是它们的乘积 TU (象 § 6.2 那样，先作用 T，后作用 U). 这一节中，我们只考虑矢量空间 V 到自身的两个线性变换 T 和 U 的乘积. 那么 TU 可以定义为 V 到自身的线性变换，满足

$$\xi(TU)=(\xi T)U, \quad 对 V 中每个矢量 \xi.$$

例如，如果按(8)式的切变换之后再作用一个相似变换 D_k：把 (x', y') 变到 $x''=kx'$，$y''=ky'$，它们的综合效果是把 (x, y) 变到

$x''=kx+kay$, $y''=ky$. 这个乘积 S_aD_k 仍然是线性的.

定理 4 两个线性变换的乘积是线性变换.

证明 按照定义，乘积TU把任意ξ映射到$\xi(TU)=(\xi T)U$. 由于T和U都是线性的,所以有

$$(c\xi+d\eta)TU=[c(\xi T)+d(\eta T)]U$$
$$=c(\xi TU)+d(\eta TU), \tag{16}$$

这个公式就是说, TU 也满足线性变换的定义条件(1).

这个结论意味着，对于T和U的两个齐次线性方程组(10)可以结合起来产生对于TU的齐次线性方程组. 具体地说，设对应于矩阵A的变换

$$x'=xa_{11}+ya_{21}, \quad y'=xa_{12}+ya_{22}, \qquad A=\begin{pmatrix}a_{11} & a_{12}\\ a_{21} & a_{22}\end{pmatrix} \tag{17}$$

后面有平面的第二个线性变换,它把(x',y')映射到(x'',y'')，其中

$$x''=x'b_{11}+y'b_{21}, \quad y''=x'b_{12}+y'b_{22}, \qquad B=\begin{pmatrix}b_{11} & b_{12}\\ b_{21} & b_{22}\end{pmatrix}. \tag{18}$$

把(17)代入(18),得到结合后的变换为

$$\begin{aligned}x''&=(a_{11}b_{11}+a_{12}b_{21})x+(a_{21}b_{11}+a_{22}b_{21})y,\\ y''&=(a_{11}b_{12}+a_{12}b_{22})x+(a_{21}b_{12}+a_{22}b_{22})y.\end{aligned} \tag{19}$$

这个乘积变换的系数矩阵是由原来矩阵A和B根据下面重要法则计算出来:

$$\begin{pmatrix}a_{11} & a_{12}\\ a_{21} & a_{22}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}b_{11} & b_{12}\\ b_{21} & b_{22}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a_{11}b_{11}+a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12}+a_{12}b_{22}\\ a_{21}b_{11}+a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12}+a_{22}b_{22}\end{pmatrix}. \tag{20}$$

这个运算结果的第一行第二列元素只包含A的第一行元素和B的第二列元素,等等. 这种乘法法则是个省事的方法,它避免了由变量代换(象(19)式那样)而带来的麻烦.

对于$n\times n$矩阵,类似的公式也成立,这是因为定理2和定理4指出,变换$T,U:F^n\to F^n$的乘积一定产生一个相应的矩阵的乘积.

我们现在来计算对应于 T_AT_B 的矩阵乘积 AB，以便给出法则

$$T_AT_B=T_{AB}. \tag{21}$$

由定理 2，$\varepsilon_iT_A=\sum_j a_{ij}\varepsilon_j$，$\varepsilon_jT_B=\sum_k b_{jk}\varepsilon_k$. 因此

$$\varepsilon_i(T_AT_B)=(\varepsilon_iT_A)T_B=\Big(\sum_j a_{ij}\varepsilon_j\Big)T_B=\sum_j a_{ij}(\varepsilon_jT_B)$$

$$=\sum_j a_{ij}\Big(\sum_k b_{jk}\varepsilon_k\Big)=\sum_k c_{ik}\varepsilon_k,$$

其中

$$c_{ik}=\sum_j a_{ij}b_{jk}=a_{i1}b_{1k}+a_{i2}b_{2k}+\cdots+a_{in}b_{nk}. \tag{22}$$

因此，为使(21)成立，矩阵乘积 $C=AB$ 必须由(22)式来定义. 我们采用这个定义.

定义 *$n\times n$ 矩阵 A 和 $n\times n$ 矩阵 B 的乘积 AB 定义为 $n\times n$ 矩阵 C，它的第 i 行第 k 列元素 c_{ik} 由(22)式给出.*

两个矩阵的乘积也可以用语言来描述：乘积 AB 的第 i 行第 k 列元素 c_{ik} 是通过 A 的第 i 行与 B 的第 k 列“相乘”而得到. 行与列“相乘”的意思是把它们相应的元素相乘然后再把结果相加.

从矩阵乘法和变换乘法之间的对应关系(21)直接推出，矩阵乘法满足结合律. 用符号表示就是

$$A(BC)=(AB)C. \tag{23}$$

这因为等式两边的矩阵分别对应于变换 $T_A(T_BT_C)$ 和 $(T_AT_B)T_C$，但根据变换乘法的结合律(§ 6.2)，它们是相等的.

矩阵乘法不仅满足结合律，而且还满足对于矩阵和的分配律，这因为矩阵 $(A+B)C$ 的元素 d_{ik} 由(22)那样的公式给出：

$$d_{ik}=\sum_j(a_{ij}+b_{ij})c_{jk}=\sum_j a_{ij}c_{jk}+\sum_j b_{ij}c_{jk}.$$

这就把 d_{ik} 分成 AC 的元素 g_{ik} 和 BC 的元素 h_{ik} 之和，于是就证明了下面两个分配律中的第一个：

$$(A+B)C=AC+BC, \qquad A(B+C)=AB+AC. \tag{24}$$

对于与d 的"数乘"积，我们也可以验证下面定律

$$(dA)B=d(AB) \quad 和 \quad A(dB)=d(AB). \tag{25}$$

把定律(24)和(25)概括起来就是说，矩阵乘法是双线性的，这是因为这些定律的前一半公式结合起来得到 $(dA+d^*A^*)B=d(AB)+d^*(A^*B)$. 这恰恰表明，用矩阵$B$右乘是所有$n\times n$ 矩阵X组成的矢量空间上的一个线性变换 $X\mapsto XB$. (24)和 (25) 的另一半公式断言，用矩阵A左乘也是线性变换.

与F^n 的恒等变换T_I 对应的是$n\times n$ 单位矩阵 I, 它的主对角线上(从左上方到右下方)的元素 $e_{ii}=1$, 而其他元素都是零. 这是因为对所有 $i=1, \cdots, n$ 有 $\varepsilon_i T_I=\varepsilon_i$. 因为$I$表示恒等变换，所以它具有性质：对每个$n\times n$ 矩阵A, 有 $IA=A=AI$.

我们可以把前面的结论概括如下：

定理 5 域F上的所有$n\times n$ 矩阵组成的集合在乘法之下是封闭的，该乘法满足结合律，具有单位元素，并且对于矢量加法和数乘运算是双线性的.

然而，乘法不满足交换律，比如

$$\begin{pmatrix}-1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0 & -1\\ -1 & 0\end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix}0 & 1\\ -1 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}-1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{pmatrix}.$$

提示：对于 § 6.1中的正方形，这些矩阵引导出什么样的几何变换？

不是所有非零矩阵都有乘法逆元素，例如矩阵$\begin{pmatrix}1 & 0\\ 3 & 0\end{pmatrix}$, 它表示一个在$x$轴上的斜投影，不能引导出一一变换，因而不是映上的；所以它没有左逆元素和右逆元素(§ 6.2 的定理1). 类似地，消去律也不成立，因为存在很多零因子，比如

$$\begin{pmatrix}1&0\\0&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0&0\\3&2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&0\\0&0\end{pmatrix},\quad \begin{pmatrix}2&4\\-1&-2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0&2\\0&-1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&0\\0&0\end{pmatrix}$$

中等号左边的矩阵.

公式(15)和(21)断言下面的重要原理.

定理 6 F^n 的线性变换代数与 F 上所有 $n\times n$ 矩阵代数，在定理 2 的对应 $T_A\leftrightarrow A$ 之下是同构的.

这就暗示了，定理 5 中所断言的关于矩阵代数的一些定律实际上对任意矢量空间的线性变换也是正确的. 这种推测是容易验证的，并且当我们应用于适当的无穷维矢量空间时，就直接导出"运算微积"的某些形式.

例 1 设 V 是由实变量 x 的所有函数组成，J 是变换或"算子" $[f(x)]J=f(x+1)$. 如果 I 是恒等变换，则算子 $\Delta=J-I$ 称为"差分算子"，它把 $f(x)$ 变换到 $f(x+1)-f(x)$. 算子 J 和 Δ 都是线性的，这因为 $[cf(x)+dg(x)]J=c[f(x)]J+d[g(x)]J$. 虽然可以应用关于线性的定义，但是我们注意，在无穷维空间中并不能建立齐次线性方程组. 对固定的 $a(x)$，运算 $f(x)\to a(x)f(x)$ 也是线性的.

例 2 微分算子 D 用于 C^∞ 空间，C^∞ 是由具有任意阶导数的所有函数组成，D 把 $f(x)$ 映射到 $f'(x)$，它是线性的. 泰勒定理用符号表示可以写成 $e^D=J$.

例 3 对于两个变量的函数 $f(x,y)$，存在相应的线性算子 J_x, J_y, D_x, D_y, Δ_x, Δ_y. 例如，$[f(x,y)]J_x=f(x+1,y)$，$[(f(x,y)]D_x=f'_x(x,y)$.

习　题

1. 对矩阵

$$A=\begin{pmatrix}1&1\\0&1\end{pmatrix},\quad B=\begin{pmatrix}1&-1\\0&1\end{pmatrix},\quad C=\begin{pmatrix}1&3\\2&1\end{pmatrix},\quad D=\begin{pmatrix}4&0\\2&1\end{pmatrix}$$

计算下列各式:

(a) AB, BA, $A^2+AB-2B$;

(b) $(A+B-I)(A-B+I)-(A+2B)(B-A)$;

(c) DB, AC, AD;

(d) 对于乘积$(AC)D$, $A(CD)$验证结合律.

2. 利用矩阵乘法列出下列各变换(按照 § 8.1 中的记号)方程:

(a) D_kS_a, (b) S_aD_k,

(c) $R_\theta S_a(\theta=45°)$, (d) $R_\theta S_a D_k(\theta=30°)$,

(e) $D_kS_aD_k$.

3. 何时 $S_aD_k=D_kS_a$(按习题 2 的记号)?

4. 用 T_n 表示 § 8.1 习题 4 (n) ($n=a, b, c, d$)所描述的变换. (用矩阵)计算下列乘积:

(a) T_bT_c, (b) T_aT_c, (c) $T_bT_aT_b$,

(d) T_dT_c, (e) $T_cT_bT_d$.

5. 证明定律(25)和定律(24)的第二个公式.

6. (a) 展开$(A+B)^3$,

(b) 证明 $A^3A^2=A^2A^3$.

7. 直接从定义(22)证明矩阵乘法的结合律.

8. 考虑两个矩阵的新"乘积"$A\times B$, 把它定义为A和B的"行与行"相乘. 这个乘积满足结合律吗?

9. (a) 设

$$B=\begin{pmatrix}1&2&1\\1&3&2\\1&4&6\end{pmatrix},\qquad E_1=\begin{pmatrix}0&0&1\\0&1&0\\1&0&0\end{pmatrix},$$

$$E_2=\begin{pmatrix}1&0&k\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix},\qquad E_3=\begin{pmatrix}a&0&0\\0&b&0\\0&0&c\end{pmatrix},$$

计算乘积 BE_1, BE_2, BE_3, E_2E_3, E_1E_3.

(b) 设 A 是任意 3×3 矩阵, AE_3 与 A 有什么关系?

(c) 描述一下用 E_1 和 E_2 右乘任意 3×3 矩阵所产生的效果.

10. 不用矩阵证明: 对于V到它自身的任意线性变换 R, S, T, 有定律

$$R(S+T)=RS+RT,$$

$$(R+S)T=RT+ST,$$
$$S(cT)=c(ST).$$

*11. 证明: 如果 R, S, T 是矢量空间的任意变换(线性的或者不是线性的), 那么 $R(S+T)=RS+RT$ 成立, 但是 $(R+S)T=RT+ST$ 一般来说并不成立, 除非 T 是线性的.

12. 求出所有同习题 9 中的矩阵 $E_3(a,b,c$ 不同$)$ 可交换的矩阵.

*13. 证明: 同习题 1 的矩阵 D 可交换的每个矩阵可以表示成形式
$$aI+bD.$$

14. 设 A 是任意 $n\times n$ 矩阵, 证明: 所有同 A 可交换的 $n\times n$ 矩阵组成的集合 $C(A)$, 在加法和乘法运算之下是封闭的.

*15. 证明: 每个 $n\times n$ 矩阵 A 满足形为
$$A^m+c_{m-1}A^{m-1}+\cdots+c_1A+c_0I=0,\quad m\leqslant n^2$$
的方程.

*16. (a) 设 $A=(a_{ij})$ 是 $n\times n$ 实数矩阵, M 是 $|a_{ij}|$ 中最大的一个. 证明: A^k 的元素是有界的, 其数值不超过 $n^{k-1}M^k$.

(b) 证明: 级数 $I+A+\dfrac{A^2}{2!}+\dfrac{A^3}{3!}+\cdots$ 总是收敛的. (它可以用来定义矩阵 A 的指数函数 e^A.)

在习题 17～21 中采用上面例 1～3 的记号.

17. (a) 证明 D 是线性的.

(b) 指出为什么 $e^D=J$.

18. 证明: $D_xD_y=D_yD_x$.

*19. (a) 化简 $xD-Dx$, $x\Delta-\Delta x$, $x\Delta^2-\Delta^2x$.

(b) 化简 $x^iD^j-D^jx^i$, $x^i\Delta^j-\Delta^jx^i$.

*20. 定义拉普拉斯算子 ∇^2 为 $\nabla^2=D_x^2+D_y^2$. 求
$$x\nabla^2-\nabla^2x,\ y(\nabla^2)^2-(\nabla^2)^2y,\ \nabla^2(x^2+y^2)-(x^2+y^2)\nabla^2.$$

*21. 用二项定理展开 $\Delta^n=(J-I)^n$.

§8.4 对角矩阵·置换矩阵·三角形矩阵

一个方阵 $D=(d_{ij})$ 称为对角矩阵当且仅当对于 $i\neq j$ 时 $d_{ij}=0$; 也就是当且仅当 D 的所有非零元素都在主对角线(从左上方到

右下方)上. 两个对角矩阵相加或相乘,仅仅是对角线上相应的元素相加或相乘(为什么?). 如果D的所有对角线元素d_{ii}都非零,那么对角矩阵$E=(e_{ij})$(其中$e_{ii}=d_{ii}^{-1}$)是D的逆,这个逆是在$DE=I=ED$的意义下. 那么我们可以证明

定理7 所有$n\times n$对角矩阵,如果其对角线元素都是域F上的非零元素,那么它们在乘法之下构成交换群.

一个方阵P,如果它的每一行和每一列都只有某个元素为1,其余元素都为零,那么称P为置换矩阵.

3×3置换矩阵共有六个,它们是单位矩阵I和矩阵

$$\begin{pmatrix}0&1&0\\1&0&0\\0&0&1\end{pmatrix},\quad\begin{pmatrix}1&0&0\\0&0&1\\0&1&0\end{pmatrix},\quad\begin{pmatrix}0&0&1\\0&1&0\\1&0&0\end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}0&0&1\\1&0&0\\0&1&0\end{pmatrix},\quad\begin{pmatrix}0&1&0\\0&0&1\\1&0&0\end{pmatrix}.$$

因为矩阵的行是单位矢量的变换,所以矩阵P是置换矩阵当且仅当它所对应的V_n的线性变换T_P是单位矢量$\varepsilon_1, \cdots, \varepsilon_n$的一个置换. 因此全体$n\times n$置换矩阵与$n$个符号的$n!$种可能的置换(§6.9)一一对应,并且这个对应是一个同构.

定理8 全体$n\times n$置换矩阵在乘法之下构成一个群,它与n个字母的对称群同构.

还有另外一些重要的矩阵类. 矩阵M如果它的每行和每列都恰有一个非零元素,则称M是单项矩阵;任意这样的矩阵可以通过把置换矩阵中的1用任意非零元素来代替而得到. 例如

$$M_1=\begin{pmatrix}0&0&5\\-2&0&0\\0&3&0\end{pmatrix},\quad M_2=\begin{pmatrix}0&7&0\\0&0&-3\\4&0&0\end{pmatrix},\quad M_3=\begin{pmatrix}0&4\\-1&0\end{pmatrix}.\qquad(26)$$

一个方阵 $T=(t_{ij})$ 如果它的对角线下面的元素都是零，也就是如果当 $i>j$ 时，$t_{ij}=0$，则称 T 为三角形矩阵. 如果矩阵 S 的主对角线上的元素和主对角线下面的元素都是零，那么称 S 为严格三角形矩阵. 这两种类型的矩阵，在 4×4 的情况下可以示意地表示成

$$T=\begin{pmatrix}q & r & s & t\\ 0 & u & v & w\\ 0 & 0 & x & y\\ 0 & 0 & 0 & z\end{pmatrix},\qquad S=\begin{pmatrix}0 & u & v & w\\ 0 & 0 & x & y\\ 0 & 0 & 0 & z\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}. \tag{27}$$

这里字母表示任意元素. 数量矩阵是指可以写成 cI 的矩阵，这里 I 是单位矩阵.

这种按照矩阵的非零元素规定矩阵类型的方案，不是构造矩阵群的唯一方法. 任意线性变换群都可以用相应的矩阵群来表示. 例如，正方形对称群是由线性变换组成. 选取原点在正方形的中心，x 轴平行于正方形的一条边. 如果表示运动 R, R', H 和 D 的方程是通过 x 和 y 写出（见 §6.1 中的描述），那么它们给出的变换具有下面矩阵形式

$$R\to\begin{pmatrix}0 & -1\\ 1 & 0\end{pmatrix},\qquad R'\to\begin{pmatrix}-1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix},$$

$$H\to\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix},\qquad D\to\begin{pmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{pmatrix}.$$

这个群的其他四个元素可以类似地表示出来. §6.4 给出的这个群的乘法表可以通过这里相应的矩阵相乘来计算(试一试！). 换句话说，正方形对称群与八个 2×2 矩阵组成的群同构.

前面的例子表明，已知矩阵 A 可以有逆 A^{-1}，使得 $AA^{-1}=A^{-1}A=I$. 这样的矩阵称为非奇异矩阵或可逆矩阵；我们将在 §8.6 中系统地研究它们.

习　题

1. 一个 $n\times n$ 矩阵 A 在它的右边乘上一个对角矩阵 D，其效果是什么？

2. 如果 D 是对角矩阵，并且对角线上的所有元素都不同，那么什么样的矩阵 A 与 D 可交换(何时 $AD=DA$)？

3. 证明：主对角线上的元素是 1 的 2×2 三角形矩阵表示一个切变换.

4. 明显地列出全体 3×3 置换矩阵与对称群之间的同构.

5. 设 S_i 是由第 i 个单位矢量 ε_i 张成的 V_n 的一维子空间. 证明：非奇异矩阵 D 是对角矩阵当且仅当它所对应的线性变换 T_D 把每个子空间 S_i 映射到自身.

6. 对于单项矩阵，作类似于习题 5 的描述.

7. (a) 证明：单项矩阵 M 可以唯一地表示成形式 $M=DP$，这里 D 是非奇异对角矩阵，P 是置换矩阵.（提示：运用习题 5, 6.）

   (b) 把正文中的矩阵 M_1 和 M_2 写成形式 DP 和 PD.

   *(c) 列出单项矩阵群到置换矩阵群上的同态映射.

8. 描述单项矩阵 M 的逆，并求出(26)式中矩阵 M_1 和 M_2 的逆.

9. 设 M 是单项矩阵，D 是对角矩阵，证明：$M^{-1}DM$ 是对角矩阵.

10. 设 P 是置换矩阵，D 是对角矩阵，明显地描述变换 $P^{-1}DP$ 的形式.

11. 设 P 是置换矩阵，PA 的行与 A 的行之间有怎样的关系？

12. 如果矩阵 A 的某个幂是 O，则称 A 是幂零矩阵. 证明：任意严格三角形矩阵是幂零矩阵.（提示：试验 3×3 的情形.）

13. 把矩形对称群表示为矩阵群.

14. 对于以 $(\pm 1, \pm 1)$ 为顶点的正方形对称群，计算出表示对称 H, D, V 的矩阵. 验证 $HD=DV$.

*15. 在习题 7 中证明：公式 $M=DP$ 定义了一个群同态 $M\mapsto P$. 求出它的核.

§8.5　长方矩阵

迄今我们只考虑了 $n\times n$ 方阵的乘法，现在我们讨论长方矩阵的乘法，也就是 $m\times n$ 矩阵的乘法，这里一般假定 $m\neq n$.

一个 $m\times n$ 矩阵 $A=(a_{ij})$ 和一个 $n\times r$ 矩阵 $B=(b_{jk})$，它们具有相同的 n，它们确定一个 $m\times r$ 矩阵 C 作为它们的乘积 $AB=(c_{ik})$，C 的元素为

$$c_{ik}=\sum_j a_{ij}b_{jk},$$

这里对 j 从 1 到 n 求和. 这种"行与列"的乘积，只有当 A 的每行长度恰好与 B 的每列长度一样时，才能构成，因此必须假定 A 的列数 n 等于 B 的行数 n. 比如，$m=1, n=2, r=3$,

$$(x_1, x_2)\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{pmatrix}$$
$$=(x_1a_{11}+x_2a_{21}, x_1a_{12}+x_2a_{22}, x_1a_{13}+x_2a_{23}).$$

同上面公式(21)，(22)一样，在定理 2 的意义下，矩阵乘积 AB 对应于线性变换 $T_A:F^m\to F^n$ 和 $T_B:F^n\to F^r$ 的乘积 T_AT_B，其中 T_A 和 T_B 分别与矩阵 A 和 B 相对应. 这里我们象通常那样用

$$\xi(TU)=(\xi T)U, \quad 对 V 中一切 \xi \qquad (28)$$

来定义线性变换 $T:V\to W$ 与线性变换 $U:W\to X$ 的乘积.

对于方阵成立的代数定律，对于长方矩阵也都成立，只要假定这些长方矩阵具有合适的维数，以保证所有的乘法都满足定义. 例如，$m\times m$ 单位矩阵 I_m 和 $n\times n$ 单位矩阵 I_n 满足

$$I_mA=A=AI_n \qquad (当 A 是 m\times n 矩阵). \quad (29)$$

长方矩阵的乘法同(24)和(25)那样，仍然是双线性的. 结合律是

$$A(BC)=(AB)C \qquad (A 是 m\times n 矩阵, B 是 n\times r 矩阵, C 是 r\times s 矩阵). \quad (30)$$

另外，证明这个定律最好把长方矩阵解释为线性变换.

象(11)式那样，$m\times n$ 矩阵 A 的转置是 $n\times m$ 矩阵 A^T，它的元素 $a^T_{ij}=a_{ji}(i=1, \cdots, n;\ j=1, \cdots, m)$. 转置矩阵 A^T 的第 i 行是

原矩阵A的第i列，反之亦然．我们把矩阵A按它的主对角线反射也可以得到转置矩阵A^{τ}．为了计算乘积$AB=C$的转置矩阵C^{τ}，我们用公式

$$c_{ik}^{\tau}=c_{ki}=\sum_j a_{kj}b_{ji}=\sum_j b_{ji}a_{kj}=\sum_j b_{ij}^{\tau}a_{jk}^{\tau}. \qquad (31)$$

这个结果恰好是乘积$B^{\tau}A^{\tau}$的(i,k)上的元素．(注意，反序．)这就证明了下面的第一个定律：

$$(AB)^{\tau}=B^{\tau}A^{\tau},\quad (A+B)^{\tau}=A^{\tau}+B^{\tau},\quad (cA)^{\tau}=cA^{\tau}. \qquad (32)$$

因此，对应$A\longleftrightarrow A^{\tau}$保持了和并使乘积反序，故有时也称为反自同构．因为$(A^{\tau})^{\tau}=A$，所以这个反自同构称为“对合”的反自同构．

全都使用长方矩阵表示有几个优点．例如，F上n-数组的空间F^n中的矢量ξ可以看作正好是一行的$1\times n$矩阵X，或称为“行矩阵”．这允许我们把(10)式所定义的方程组$y_j=\Sigma x_i a_{ij}$解释为行矩阵Y是行矩阵X与矩阵A的乘积．这样，线性变换$T_A:F^m\to F^n$就可以缩写成形式

$$Y=XA,\quad X\in F^m,\quad Y\in F^n. \qquad (33)$$

还有，“数乘”积cX正好是1×1矩阵c与$1\times n$(行)矩阵X的乘积．

列矢量 我们注意，虽然在方程$XA=Y$中Y是一个行矢量，但它的元素在表达式(10)中却以单列的形式出现．因此通常把矩阵方程$XA=Y$改写成转置形式$Y^{\tau}=A^{\tau}X^{\tau}$，这里$Y^{\tau}$和$X^{\tau}$都是列矢量．改变记号后，结果得到(11′)形式的方程$BX=Y$，其中$B=A^{\tau}$，$X=(x_1,\cdots,x_n)^{\tau}$，$Y=(y_1,\cdots,y_n)^{\tau}$，$X$和$Y$都是列矢量．

在处理双线性型和二次型时，行矢量和列矢量要一起使用．例如，两个矢量的内积$x_1y_1+\cdots+x_ny_n$(§7.9)仅仅是行矩阵X和列矩阵Y^{τ}的乘积，因此

$$(X,Y)=XY^{\tau},\quad X\text{和}Y\text{是行矩阵}. \qquad (34)$$

矩阵A和B的行与列的乘法实际上是A的第i行与B的第k列的矩阵乘法，于是矩阵乘积的定义可写成

$$AB=(c_{ik}), \quad 其中\ c_{ik}=A_iB^{(k)} \tag{35}$$

这里我们使用了记号

$$A_i=A\ 的第\ i\ 行, \quad B^{(k)}=B\ 的第\ k\ 列. \tag{36}$$

乘积AB的整个第i行$(c_{i1},\cdots,c_{in})$只用了A的第i行和B的各列，因此它是A_i与整个B的乘积. 类似地，AB的第k列只由B的第k列产生出来. 用(36)的记号，这些运算法则就是

$$(AB)_i=A_iB, \quad (AB)^{(k)}=AB^{(k)}. \tag{37}$$

通过把矩阵B写成以它的列为元素的行矩阵，可以把第二个法则具体化，也就是

$$A(B^{(1)} \quad B^{(2)} \quad \cdots \quad B^{(r)})=(AB^{(1)} \quad AB^{(2)} \quad \cdots \quad AB^{(r)}). \tag{38}$$

这些列还可以分组，构成较大的子矩阵. 比如，6×5矩阵B可以看作6×2矩阵$D_1=(B^{(1)} \quad B^{(2)})$和$6\times3$矩阵$D_2=(B^{(3)} \quad B^{(4)} \quad B^{(5)})$并列构成整个$6\times5$矩阵$B=(D_1 \quad D_2)$. 由(38)，乘法法则变为

$$A(D_1 \quad D_2)=(AD_1 \quad AD_2),\ D_1\ 和\ D_2\ 是\ n\ 行的矩阵块. \tag{39}$$

如果我们把$n\times r$矩阵B分成n个行$B_1,\cdots,B_n$，而$Y=(y_1,\cdots,y_n)$是行矩阵，那么乘积YB是行矩阵

$$\begin{aligned}YB&=(y_1b_{11}+\cdots+y_nb_{n1},\cdots,y_1b_{1r}+\cdots+y_nb_{nr})\\&=y_1(b_{11},\cdots,b_{1r})+\cdots+y_n(b_{n1},\cdots,b_{nr})\\&=y_1B_1+\cdots+y_nB_n.\end{aligned}$$

于是乘积YB由行Y与行$B_1,\cdots,B_n$组成的列相乘而构成. 例如，AB的第i行是由行矩阵$A_i=(a_{i1},\cdots,a_{in})$与$B$的乘积来定义，因此

$$(AB)_i=a_{i1}B_1+\cdots+a_{in}B_n, \quad i=1,\cdots,m. \tag{40}$$

于是AB的每一行是B的所有行的线性组合. 这些公式是矩阵通

过分成"块"或子矩阵相乘的方法的特例．概括描述这个方法的其他情形也是很方便的．

$$\underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1s} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{ms} \end{pmatrix}}_{M_1}\!\!\!\!\!\underbrace{\begin{matrix} a_{1,s+1} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m,s+1} & \cdots & a_{mn} \end{matrix}}_{M_2}\begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{s1} & \cdots & b_{sr} \\ \hline b_{s+1,1} & \cdots & b_{s+1,r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nr} \end{pmatrix}\begin{matrix} \}N_1 \\ \\ \}N_2 \end{matrix}$$

设矩阵 A 的 n 列是由子矩阵 M_1 的 s 列和它后面子矩阵 M_2 的 $n-s$ 列组成．把矩阵 B 的行相应地分开，使得 $s\times r$ 矩阵 N_1 在 $(n-s)\times r$ 矩阵 N_2 的顶上．关于 $AB=C$ 的乘积公式分成两个相应的部分

$$c_{ik}=(a_{i1}b_{1k}+\cdots+a_{is}b_{sk})+(a_{i,s+1}b_{s+1,k}+\cdots+a_{in}b_{nk}). \quad (41)$$

第一个括号中只用了 A 的第一块 M_1 的第 i 行，和 B 的上边一块 N_1 的第 k 列，因此第一个括号实际上是乘积块 M_1N_1 的第 i 行第 k 列元素 d_{ik}. 同样，(41)的第二个括号是乘积 M_2N_2 的元素 d^*_{ik}. 因此 $c_{ik}=d_{ik}+d^*_{ik}$，这样整个乘积 AB 是矩阵和 $M_1N_1+M_2N_2$．这就是

$$(M_1 \quad M_2)\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \end{pmatrix}=M_1N_1+M_2N_2. \quad (42)$$

这个公式是分块矩阵的行与列的乘法公式，这恰好同矩阵元素的行与列乘法一样．如果把 A 的行任意分开，同时把 B 的列也相应地分开，那么类似的结果成立．如果行和列都分开，那么把公式(42)和法则(39)结合起来就得到分块矩阵乘法公式

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{pmatrix}$$

$$=\begin{pmatrix} M_{11}N_{11}+M_{12}N_{21} & M_{11}N_{12}+M_{12}N_{22} \\ M_{21}N_{11}+M_{22}N_{21} & M_{21}N_{12}+M_{22}N_{22} \end{pmatrix}. \qquad (43)$$

假定这里的划分满足：M_{11} 的列数等于 N_{11} 的行数. 运算法则(43)恰好同 § 8.3 公式(20)关于 2×2 矩阵乘法法则一样，只不过这里的元素 M_{ij} 和 N_{ij} 是子矩阵或矩阵块，而不是标量. 因此我们得出结论：在适当划分子块后，分块矩阵乘法与普通矩阵乘法完全一样.

习　　题

1. 设

$$A=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}, \qquad B=\begin{pmatrix} i & 0 & -i \\ 0 & 1 & 1+i \end{pmatrix},$$

$$X=(1,-1), \qquad Y=(i,0).$$

(a) 求 XA, XB, YA, YB.

(b) 求 $3A-4B,\ A+(1+i)B, [X-(1+i)Y](iA+5B)$.

(c) 求 $BA^{\tau}, AB^{\tau}, XAB^{\tau}, BA^{\tau}Y^{\tau}$.

2. 证明：如果 X 是任意行矢量，那么 XX^{τ} 是 X 同它自身的内积，而 $X^{\tau}X$ 是以 $a_{ij}=x_ix_j$ 为元素的矩阵 A.

3. 设

$$A=\begin{pmatrix} 2 & 3 & 0 & 0 \\ 5 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix},$$

$$B=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 4 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \qquad C=\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix},$$

求 AB, BA, AC 和 BC.

4. 设 I^* 是 $(r+n)\times n$ 矩阵，它是由 $r\times n$ 零矩阵上面再放上一个 $n\times n$ 单位矩阵而构成. 任意一个 $n\times(r+n)$ 矩阵用 I^* 来乘其效果如何？

*5. 证明分块矩阵乘法法则(43).

§8.6 逆 矩 阵

有限维矢量空间的线性变换分为两类：或者是双射（一一映上），或者既不是单射也不是满射（既不是一一映入也不是映上）. 例如，三维欧几里得空间到 (x, y) 平面上的斜投影 $(x, y, z)\mapsto(x, y+z, 0)$，既不是单射也不是满射.

定义 矢量空间 V 到它自身的线性变换 T，如果它是 V 到 V 上的双射，则称 T 是非奇异的或可逆的. 否则，称 T 是奇异的.

非奇异的线性变换 T 是从 V 到 V 上的双射，它保持加法和"数乘"积两种代数运算，因此它是矢量空间 V 到它自身的同构. 所以 V 的非奇异线性变换可以称为 V 的自同构.

判断一个线性变换是奇异的还是非奇异的这一重要事实，最直接的方法是使用第七章推导出的线性无关理论，也就是，利用矢量空间 V 的一组固定基底 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$，让已知的线性变换 T 在这组基底上进行运算，最后判断无关性.

定理 9 具有有限基底 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 的矢量空间 V 的线性变换 T 是非奇异的当且仅当矢量 $\alpha_1T, \cdots, \alpha_nT$ 在 V 中线性无关. 如果 T 是非奇异的，那么 T 有一个（双边）线性逆 T^{-1}，满足 $TT^{-1}=T^{-1}T=I$.

证明 首先假定 T 是非奇异的. 如果 $\alpha_1T, \cdots, \alpha_nT$ 之间存在一个线性关系 $\Sigma x_i(\alpha_iT)=\mathbf{0}$，那么

$$(x_1\alpha_1+\cdots+x_n\alpha_n)T=x_1(\alpha_1T)+\cdots+x_n(\alpha_nT)=\mathbf{0}.$$

因为 $\mathbf{0}T=\mathbf{0}$，并且 T 是一一的，这就推出 $x_1\alpha_1+\cdots+x_n\alpha_n=\mathbf{0}$，因此根据 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 的线性无关性推出 $x_1=\cdots=x_n=0$. 所以 $\alpha_1T, \cdots, \alpha_nT$ 是线性无关的.

反过来，假设矢量 $\beta_1=\alpha_1T, \cdots, \beta_n=\alpha_nT$ 线性无关，并回忆一下 § 6.2 讲过的"变换 T 是一一映上当且仅当它有双边逆元素".

因为 V 是 n 维的，所以 n 个线性无关矢量 $\beta_1, \cdots, \beta_n$ 是 V 的一组基底. 根据定理 1, 存在 V 的线性变换 S 使得

$$\beta_1 S=\alpha_1, \quad \beta_2 S=\alpha_2, \quad \cdots, \quad \beta_n S=\alpha_n.$$

于是对每个 $i=1, \cdots, n$, 有 $\beta_i(ST)=\beta_i$. 因为 $\beta_1, \cdots, \beta_n$ 是一组基底，所以根据定理 1 只存在一个线性变换 R, 使得对每个 i 有 $\beta_i R=\beta_i$, 于是 R 是恒等变换. 因此 $ST=I$. 类似地，由于 $\alpha_i(TS)=\beta_i S=\alpha_i$, 并且 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 是一组基底，所以 $TS=I$. 于是 S 是 T 的逆，因而 T 是非奇异的.

这样，为检验 T 是否是非奇异的，我们可以检验 V 的任意有限基底在 T 作用下的象的线性无关性，检验的方法如 § 7.6 所用的方法一样.

推论 1 设 T 是有限维矢量空间 V 的线性变换. 如果 T 是非奇异的，那么 (i) T 有双边线性逆；(ii) 由 $\xi T=\mathbf{0}$ 和 ξ 在 V 中可推出 $\xi=\mathbf{0}$; (iii) T 是从 V 到 V 的一一映射；(iv) T 把 V 变换到 V 上. 如果 T 是奇异的，那么 (i′) T 既没左逆也没有右逆；(ii′) 对某个 $\xi\neq\mathbf{0}$ 有 $\xi T=\mathbf{0}$; (iii′) T 不是一一的；(iv′) T 把 V 变换到 V 的某一真子空间中.

证明 条件 (i) 已在定理 9 中证明了. 再有，如果对某个 $\xi\neq\mathbf{0}$, 有 $\xi T=\mathbf{0}$, 那么因为 $\mathbf{0}T=\mathbf{0}$, T 将不是一一的，与非奇异的定义相矛盾. 这就证明 (ii). (iii) 和 (iv) 是定义的一部分. 其次，如果 T 是奇异的，那么对 V 的任意一组基底 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$, 由定理 9, $\alpha_1 T, \cdots, \alpha_n T$ 线性相关. 因此对某一组不全为零的 $x_1, \cdots, x_n$, 有

$$\mathbf{0}=x_1\alpha_1 T+\cdots+x_n\alpha_n T=(x_1\alpha_1+\cdots+x_n\alpha_n)T=\xi T.$$

因为 $\alpha_1, \cdots, \alpha_n$ 线性无关，所以 $\xi\neq\mathbf{0}$, 因此对某 $\xi\neq\mathbf{0}$, 有 $\xi T=\mathbf{0}$, 这就证明了 (ii′). 因为 $\mathbf{0}T=\mathbf{0}$, 所以由此推出 T 不是一一的，因而证明了 (iii′). 再有，因为 $\alpha_1 T, \cdots, \alpha_n T$ 线性相关，而 V 是 n 维的，所以它们张成 V 的某一真子空间，根据 § 7.4 定理 5 的推论 2, 这就证

明了(iv′). 最后, 根据 § 6.2 定理 1, (iii′)和(iv′)同(i′)是等价的. 证毕

注意, 因为推论 1 中列出的条件中每一对都是不相容的, 所以八个条件都是充分必要条件. 例如, 如果(iv)成立, 那么(iv′)就不能成立, 因此 T 不可能是奇异的, 所以它一定是非奇异的.

推论 2 如果有限维矢量空间 V 的两个线性变换的乘积 TU 是恒等变换, 那么 T 和 U 两个都是非奇异的, 而且 $T=U^{-1}$, $U=T^{-1}$, $UT=I$.

证明 因为 $TU=I$, 所以 T 有右逆元素, 因此由上面的(i′)知 T 是非奇异的, 再根据(i), T 有逆 T^{-1}. 那么有 $T^{-1}=T^{-1}(TU)=(T^{-1}T)U=U$, 如断言所述, 并且其他结论由此得出. 证毕

根据定理 6, F^n 的线性变换和 F 上的 $n\times n$ 矩阵之间在乘法之下是同构的, 所以上述结果可以平推到矩阵上去. 我们定义 $n\times n$ 矩阵 A 是非奇异的当且仅当在定理 2 意义下它对应于 F^n 的一个非奇异线性变换 T_A; 否则, 我们称 A 是奇异的. 而根据定理 2, 变换 T_A 把 F^n 的单位矢量变到矩阵 A 的行, 因此定理 9 的条件变为(参看 § 7.4 定理 6 的推论)

推论 3 域 F 上一个 $n\times n$ 矩阵是非奇异的当且仅当它的行是线性无关的, 或者等价于当且仅当这些行构成 F^n 的一组基底.

类似地, 推论 1 的条件(i)和(i′)平推成下面结果

推论 4 一个 $n\times n$ 矩阵 A 是非奇异的当且仅当它有逆矩阵 A^{-1}, 满足

$$AA^{-1}=A^{-1}A=I \qquad (A, A^{-1}, I \text{ 都是 } n\times n \text{ 矩阵}). \tag{44}$$

如果 A 有逆, 则它的转置矩阵也有逆, 这因为对(44)的两边取转置, 根据(31)我们得到 $(A^{-1})^{T}A^{T}=A^{T}(A^{-1})^{T}=I$, 所以

$$(A^{-1})^{T}=(A^{T})^{-1}. \tag{45}$$

于是, 如果 A 是非奇异的, 则 A^{T} 也是非奇异的; 而且反过来也有类

似结论.但是根据推论 3,A^T 是非奇异的当且仅当它的行线性无关.这些行实际上就是 A 的列,因此我们有

推论 5 一个方阵是非奇异的当且仅当它的列线性无关.

如果把推论 2 从线性变换平推到矩阵上,那么根据定理 6,我们得到

推论 6 每个方阵的左逆矩阵又是右逆矩阵.

如果矩阵 A 和 B 两者都有逆,那么它们的乘积也有逆,

$$(AB)^{-1}=B^{-1}A^{-1} \qquad (\text{注意反序!}) \tag{46}$$

这因为 $(AB)(B^{-1}A^{-1})=A(BB^{-1})A^{-1}=AIA^{-1}=AA^{-1}=I.$

非奇异矩阵的逆可以通过求解适当的联立线性方程组来计算.如果我们把基矢量的坐标写成

$$\begin{aligned} I_1&=(1,0,\cdots,0),\\ I_2&=(0,1,\cdots,0),\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ I_n&=(0,0,\cdots,1), \end{aligned} \tag{47}$$

那么在已知矩阵 $A=(a_{ij})$ 中,每一行 A_i 可写成这组基矢量的线性组合

$$A_i=\sum_j a_{ij}I_j.$$

我们可以试图求解这组矢量方程,把 I_j 看成"未知矢量",把 A_i 看成已知矢量;解得 I_j 是线性表达式

$$I_j=c_{j1}A_1+\cdots+c_{jn}A_n=\sum_{k=1}^{n}c_{jk}A_k. \tag{48}$$

根据(40),这个方程表明矩阵 $C=(c_{jk})$ 满足 $CA=I$,因此 $C=A^{-1}$. A^{-1} 的另一种构造方法将在 § 8.8 中给出.

例 计算矩阵

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & -2\\ -1 & 3 & 0\\ 0 & -2 & 1 \end{pmatrix}$$

的逆，把它的行写成 $A_1=I_1+2I_2-2I_3$，$A_2=-I_1+3I_2$，$A_3=-2I_2+I_3$. 这三个联立方程组有解

$$I_1=3A_1+2A_2+6A_3,$$
$$I_2=A_1+A_2+2A_3,$$
$$I_3=2A_1+2A_2+5A_3,$$

这些线性组合的所有系数 c_{jk} 组成一个逆矩阵，因为我们可以验证

$$\begin{pmatrix}3&2&6\\1&1&2\\2&2&5\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&2&-2\\-1&3&0\\0&-2&1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}.$$

从无穷维矢量空间 V 到第二个无穷维矢量空间 W（在同一个域上）的线性变换可以是一一的，但不是映上，反过来也是一样. 对于无穷维矢量空间到它自身的线性变换，上述结论同样正确. 例如，无限实数序列的空间上的线性变换 $(x_1, x_2, x_3, \cdots)\mapsto(0, x_1, x_2, x_3, \cdots)$ 是一一的，但不是映上，因此有很多（线性）右逆元素但没有左逆元素.

但是，线性变换的双边逆如果存在，那么即使 V 是无穷维空间，这个逆也一定是线性的.

定理 10 如果线性变换 $T:V\to W$ 是 V 到 W 上的一一变换，那么它的逆也是线性的.

证明 设 ψ 是 T 的唯一的逆变换，是由 W 到 V 上的变换，没有假定 ψ 是线性的. 在 W 中取矢量 ξ 和 η，并取标量 c 和 d. 因为 ψT 是 W 的恒等变换，而且 T 是线性的，所以

$$\begin{aligned}(c\xi+d\eta)\psi T&=c\xi+d\eta=c(\xi\psi T)+d(\eta\psi T)\\&=[c(\xi\psi)+d(\eta\psi)]T.\end{aligned}$$

等式两边右乘 ψ，因为 $T\psi$ 也是恒等变换，所以我们得到

$$(c\xi+d\eta)\psi=c(\xi\psi)+d(\eta\psi), \tag{49}$$

这个方程表明 ψ 是线性的.　　　　证毕

在 § 7.8 的意义之下, V 到 W 上的一一线性变换 T 是 V 到 W 的一个同构.

推论 1　V 到 W 的同构 T 把 V 的任意一组无关矢量 $\alpha_1, \cdots, \alpha_r$ 映射到 W 的一组无关矢量，并且把张成 V 的任意一组矢量 $\beta_1, \cdots, \beta_s$ 映射到张成 W 的一组矢量.

证明　如果 $\alpha_1 T, \cdots, \alpha_r T$ 之间存在线性关系

$$x_1(\alpha_1 T) + \cdots + x_r(\alpha_r T) = \mathbf{0},$$

则我们可用 T^{-1} 右乘上式，求得 $x_1\alpha_1 + \cdots + x_r\alpha_r = 0$，因此 $x_1 = \cdots = x_r = 0$，所以 $\alpha_1 T, \cdots, \alpha_r T$ 线性无关. 后一半的证明类似.

对于任意变换 $T: V \to W$，V 的子空间 S 在 T 之下的象即变换式 $S' = (S)T$ 被定义为 S 中所有矢量 ξ 的变换式 ξT 的集合. 这个象总是 W 的子空间，因为 S' 中矢量 ξT 和 ηT 的每个线性组合 $c(\xi T) + d(\eta T) = (c\xi + d\eta)T$ 仍在 S' 中.

推论 2　对于同构 $T: V \to W$, V 的任意有限维子空间 S 在 T 之下的象的维数同 S 的维数一样. 于是, T 把直线映射到直线，把平面映射到平面.

习　　题

1. 求出 § 8.3 习题 1 中矩阵 A, B, C, D 的逆.

2. (a) 证明: $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ 是非奇异的当且仅当 $ad - bc \neq 0$.

(b) 证明: 如果 A 是非奇异的，那么它的逆是 $\Delta^{-1}\begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}$，这里 $\Delta = ad - bc$.

3. 求出 § 8.1 中线性变换 R_θ, D_k, S_a 的逆.

4. 求出 § 8.1 习题 4 中的线性变换的逆.

5. (a) 当 $\theta = 45°$，计算变换 $R_\theta^{-1} U_b R_\theta$ (见 § 8.1) 对应的矩阵，这里 U_b 是变换 $x' = bx, y' = y$.

(b) 描述这个变换的几何意义.

(c) 对变换 $R_\theta^{-1}S_\alpha R_\theta$(其中 $\theta=45°$), 做(a)和(b).

6. 证明: 如果 A 满足 $A^2-A+I=O$, 那么 A^{-1} 存在, 并且等于 $I-A$.

7. 求出 § 8.3 习题 9 中矩阵 E_1, E_2 和 E_3 的逆.

8. 求出 § 8.5 习题 3 中矩阵 A 和 B 的逆. (提示: 用分块矩阵.)

9. (a) 给出 2×2 三角形矩阵的逆矩阵计算公式.

(b) 给出 3×3 三角形矩阵的逆矩阵计算公式. (提示: 用三角形逆矩阵试一试.)

(c) 证明: 对角线上的元素不为零的每个三角形矩阵的有一个三角形的逆矩阵.

10. 已知 A, B, A^{-1}, B^{-1}, C, 求出下列矩阵的逆,

(a) $\begin{pmatrix} A & O \\ O & B \end{pmatrix}$, (b) $\begin{pmatrix} A & C \\ O & B \end{pmatrix}$, (c) $\begin{pmatrix} A & O \\ C & B \end{pmatrix}$.

11. 证明: 所有非奇异的 $n\times n$ 矩阵关于矩阵乘法构成群.

12. 证明: 如果方阵的乘积 AB 是非奇异的, 那么它的两个因子 A 和 B 也是非奇异的.

*13. 不用线性变换来证明, 矩阵 A 有左逆矩阵当且仅当 A 的行线性无关.

14. 证明定理 10 的推论 2.

15. 列出一个序列 $(x_1, x_2, x_3, \cdots)$ 的空间到它自身上的线性变换, 它不是一一的.

*16. 证明: 如果线性变换 $T:V\to W$ 有右逆元素, 那么它的右逆元素也是线性的(没有假定是有限维的).

§ 8.7 秩 与 零 度

在一般情况下(见 § 6.2), 每个变换(函数) $T:S\to S_1$, 以 S 为定义域, 以 S_1 为取值域. T 的值域是变换式的集合(即定义域在 T 之下的象).

当 T 是矢量空间 V 到另一个矢量空间 W 的线性变换时, V 的象(所有 ξT 的集合)不可能是 W 的任意子集合.

引理 1 线性变换 $T:V\to W$ 的象本身是一个矢量空间(因此是 W 的子空间).

证明 因为 $c(\xi T)=(c\xi)T, \xi T+\eta T=(\xi+\eta)T$，所以变换式的集合在矢量加法和数乘运算之下是封闭的.

引理 2 设 T_A 是对应于 $m\times n$ 矩阵 A 的线性变换，那么 T_A 的象是 A 的行空间.

证明 变换 $T_A: F^m\to F^n$ 把 F^m 的每个矢量 $X=(x_1, \cdots, x_m)$ 映射到 F^n 中的 $Y=XA$, 所以 T_A 的象是由所有形为

$$Y=XA=\left(\sum x_i a_{i1}, \cdots, \sum x_i a_{in}\right)=\sum x_i\ (a_{i1}, \cdots, a_{in})$$

的 n- 数组构成. 这恰好就是 A 的行 $A_i=(a_{i1}, \cdots, a_{in})$ 的全体不同线性组合. 于是 T_A 的值域是由 A 的行矢量的一切线性组合组成的集合. 正如 § 7.5 中所定义的，这就是 A 的行空间.

§ 7.6 中我们已经定义矩阵 A 的秩为 A 的行空间的 (线性) 维数，因此它也是 T_A 的值域的维数. 更一般地，任意线性变换 T 的秩定义为 T 的象的维数(有限或无限).

因为由 m 个已知矢量张成的子空间的维数等于这个子空间中线性无关矢量的最大个数，所以 A 的秩也等于 A 的线性无关行矢量的最大个数. 由于这个理由，A 按上面定义的秩常常称为 A 的行秩，它不同于列秩，列秩是 A 的线性无关列矢量的最大个数.

同矩阵的行空间或者线性变换的值域概念成对偶的是它的零空间概念.

定义 线性变换 T 的零空间是使得 $\xi T=0$ 的所有矢量 ξ 的集合. 矩阵 A 的零空间是满足齐次线性方程组 $XA=0$ 的所有行矩阵 X 的集合.

引理 3 任意线性变换(或矩阵)的零空间是它的定义域的一个子空间.

证明 如果 $\xi T=0$ 和 $\eta T=0$, 那么对所有 c 和 d, 有

$$(c\xi+d\eta)T=c(\xi T)+d(\eta T)=0+0=0,$$

因此 $c\xi+d\eta$ 在零空间中，所以零空间是一个子空间. 证毕

已知矩阵A或线性变换T的零空间的维数称为A或T的零度(nullity). 零度和秩的关系满足一个对于矩阵和线性变换都成立的基本方程. 因为矩阵和线性变换之间存在对应关系, 我们只须对一种情况给出证明.

定理 11 秩与零度之和等于定义域的维数.

比如, 对于 $m\times n$ 矩阵, (行)秩与(行)零度之和等于 m.

证明 如果T的零度是s, 那么T的零空间N有s个元素构成的基底$\alpha_1, \cdots, \alpha_s$, 可以把它扩充成$T$的整个定义域的基底$\alpha_1, \cdots, \alpha_s, \beta_1, \cdots, \beta_r$. 因为每个$\alpha_i T=0$, 所以$\beta_1 T, \cdots, \beta_r T$张成$T$的象$R$. 此外, 由$x_1(\beta_1 T)+\cdots+x_r(\beta_r T)=0$推出$x_1\beta_1+\cdots+x_r\beta_r$在$N$中, 所以$x_1=\cdots=x_r=0$. 因此矢量$\beta_1 T, \cdots, \beta_r T$线性无关, 并构成$R$的基底. 我们得出结论: T的定义域的维数m是N的维数s与R的维数r之和: $m=s+r$. 这就是我们要证的.

定理 12 一个线性变换$T: F^n\to F^n$是非奇异的充分必要条件是下面条件之一:

(a) T的秩等于n; (b) T的零度等于0.

证明 条件(a)表明, T把F^n映上到它自身; 而条件(b)表明, $\xi T=0$可推出$\xi=0$在F^n中. 这样, 定理 12 正好重新叙述了定理 9 的推论 1 中的条件(iv)和(ii).

习 题

1. 求出§8.1 习题 1(a)～(d), 习题 4(a), (b)中所给出的线性变换的值域、零空间、秩以及零度.

2. 构造一个由$\mathbf{R}^3$到它自身的线性变换, 使得它的值域由矢量(1, 3, 2)和(3, −1, 1)张成.

3. 构造一个由$\mathbf{R}^4$到它自身的线性变换, 使得它的零空间由矢量(1, 2, 3, 4)和(2, 2, 4, 4)张成.

4. 证明: 乘积AB的行秩决不能超过A的行秩.

5. 证明：如果 $n\times n$ 矩阵 A 是非奇异的，那么对每个 $n\times n$ 矩阵 B，矩阵 AB，B 和 BA 都具有相同的秩.

6. 证明：$\text{rank}(A+B)\leq\text{rank}(A)+\text{rank}(B)$.

7. 如果已知 A 和 B 的秩，那么矩阵 $\begin{pmatrix} A & O \\ O & B \end{pmatrix}$ 的秩等于多少？

§8.8 初等矩阵

在 §7.5 中我们引进作用在矩阵 A 上的初等行运算，它们可以解释为用适当的矩阵左乘矩阵 A. 例如，矩阵中的两行互换，可以用一个矩阵左乘这个矩阵来实现，乘上的这个矩阵是把单位矩阵 I 相应的行互换而得到的. 例如，

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 0\cdot a_1+1\cdot b_1 & 0\cdot a_2+1\cdot b_2 \\ 1\cdot a_1+0\cdot b_1 & 1\cdot a_2+0\cdot b_2 \end{pmatrix}$$

$$=\begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ a_1 & a_2 \end{pmatrix}.$$

为了把矩阵的第二行加到第一行上去或者把第二行乘以标量 c，只须对矩阵前面的单位矩阵因子做同样的运算：

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} a_1+b_1 & a_2+b_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & c \end{pmatrix}\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ cb_1 & cb_2 \end{pmatrix}.$$

对 $m\times n$ 矩阵的情形，类似的结果也成立，用来表示这些初等行运算的左乘因子称为初等矩阵.

定义 *对 $m\times m$ 单位矩阵 I 做一次初等行运算所得到的矩阵 E 称为 $m\times m$ 初等矩阵.*

于是有三类初等矩阵，它们的样本是

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{50}$$

$$H_{24} \qquad\qquad I+2E_{33} \qquad\qquad I+dE_{21}$$

一般，设 I_k 表示 $m\times m$ 单位矩阵 I 的第 k 行，那么把 I 中的第 i 行与第 j 行互换，得到初等置换矩阵 $H=(h_{ij})$，它的各行 H_k 是

$$H_i=I_j,\ \ H_j=I_i,\ \ H_k=I_k \quad (k\neq i,\ j). \tag{51}$$

类似地，I 的第 i 行乘上一个非零标量 c，得到矩阵 M，它的各行 M_k 是

$$M_i=cI_i(c\neq 0), \qquad M_k=I_k(k\neq i). \tag{52}$$

如果 E_{ij} 如前所述，是一个只在第 i 行第 j 列上有一个元素 1，其他所有元素都为 0 的矩阵，那么矩阵 M 可以写成 $M=I+(c-1)E_{ij}$。最后，把 I 的第 i 行乘上 d 后加到第 j 行上去，得到初等矩阵 $F=I+dE_{ji}$，它的各行 F_k 是

$$F_j=I_j+dI_i, \qquad F_k=I_k(k\neq j). \tag{53}$$

定理 13 对 $m\times n$ 矩阵 A 所做的每种初等行运算，相当于对矩阵 A 左乘一个相应的 $m\times m$ 初等矩阵 E.

通过直接计算乘积 EA，我们可以容易地得到定理的证明。例如，考虑把 A 的第 i 行加到 A 的第 j 行上去的初等行运算。相应的初等矩阵 F 的各行 F_k 由(53)给出，乘积 FA 的每一行总是由第一个因子的各行按公式(37)求出，所以

$$(FA)_j=F_jA=(I_i+I_j)A=I_iA+I_jA=(IA)_i+(IA)_j,$$

$$(FA)_k=F_kA=I_kA=(IA)_k \qquad (k\neq j).$$

这些方程表明，FA 的各行是把 $IA=A$ 的第 i 行加到第 j 行上得到的。换句话说，这里所讨论的初等行运算把 A 变为 FA，正如定理 13 所断言的。

推论 1 每个初等矩阵E是非奇异的.

证明 E是从I通过某些行运算得到的. 这些运算的反运算对应着某个初等矩阵E^*, 并把E变回到I. 根据定理 13, 它把E变为E^*E所以$E^*E=I$, 因而E有左逆矩阵E^*, 所以是非奇异的.

推论 2 如果两个$m\times n$矩阵A和B是行等价的, 那么$B=PA$, 这里P是非奇异矩阵.

这因为, 根据定理 13 有, $B=E_sE_{s-1}\cdots E_1A$, 其中每个E_i都是初等矩阵, 所以P是非奇异的.

初等行运算和用初等矩阵左乘这两种运算之间的等价性对高斯消去法给出另一个有用的解释. 在通常情况下, 最后在主对角线上没有出现零, 在这种情况下, 一方面系数矩阵A被化成上三角形矩阵U(这是显然的), 另一方面, 因为从后面的行减去第i行的倍数的运算相当于用一个下三角形矩阵L_k左乘, 所以我们有

$$U=L_sL_{s-1}\cdots L_1A=LA, \qquad s\leqslant\frac{n(n-1)}{2},$$

这里$L=L_sL_{s-1}\cdots L_1$是下三角形矩阵. 因此$AX=B$等价于$UX=LB$, 这里$U=LA$. 因此我们可以写成$A=L^{-1}U$, 这里L^{-1}也是下三角形矩阵而U是上三角形矩阵, 这称为A的"LU 分解".

矩阵的逆可以用初等矩阵来计算. 设A是任意非奇异方阵, 根据 § 7.6 定理 9 的推论 3, 可以通过初等行运算把A化为单位矩阵I. 因此根据定理 13, 对适当的初等矩阵$E_1, \cdots, E_s$, 我们有

$$E_sE_{s-1}\cdots E_1A=I.$$

这个方程的两边都右乘A^{-1}, 那么有

$$E_sE_{s-1}\cdots E_1I=A^{-1}. \tag{54}$$

等式左边的矩阵是这列初等运算$E_1, \cdots, E_s$作用到单位矩阵I上而得到的结果. 这就证明了

定理 14 如果一个方阵A通过一系列行运算化为单位矩阵

I，那么把这同一系列行运算作用到单位矩阵 I 上，就给出矩阵 A 的逆矩阵.

这是求逆矩阵的一个有效方法. 给定任意矩阵 A，通过有限次有理运算或者得出 A 的逆矩阵，或者化成一个等价的奇异矩阵. 后一种情况 A 没有逆. 对于大于 3×3 的矩阵 A，这种方法比起用行列式理论求逆 A^{-1}(参看第十章)更为有效.

附带说一下，任意非奇异矩阵 P 是另一非奇异矩阵的逆 $(P^{-1})^{-1}$，因此，象(54)中表示的那样，P 可写成初等矩阵的乘积. 这同定理 13 的推论 1 结合起来得出下面结果.

定理 15 方阵 P 是非奇异的当且仅当它可以表示成初等矩阵的乘积

$$P=E_sE_{s-1}\cdots E_1. \tag{55}$$

推论 1 两个 $m\times n$ 矩阵 A 和 B 是行等价的当且仅当 $B=PA$，其中 P 是某一非奇异矩阵.

因为 B 与 A 行等价当且仅当 $B=E_sE_{s-1}\cdots E_1A$ 其中 $E_1,\cdots,E_s$ 都是初等矩阵(定理 13). 再根据定理 15，这相当于 $B=PA$，其中 P 是非奇异的.

定理 15 在二维情形下有简单的几何解释. 2×2 初等矩阵只有下面几种

$$H_{12}=\begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix},\quad M_1=\begin{pmatrix}c&0\\0&1\end{pmatrix},\quad M_2=\begin{pmatrix}1&0\\0&c\end{pmatrix},$$

$$F_{12}=\begin{pmatrix}1&0\\d&1\end{pmatrix},\quad F_{21}=\begin{pmatrix}1&d\\0&1\end{pmatrix}.$$

相对应的线性变换，如 § 8.1 中给出的那样，是

H_{12} 是对于过原点、与 x 轴成 $45°$ 角的直线的平面反射.

$M_i(c>0)$ 是平行于 x 轴或 y 轴的压缩(或伸长).

$M_i(c<0)$ 是先压缩(或伸长)，然后再对于 x 轴或 y 轴进行

反射.

F_{ij} 是平行于某一轴的切变换.

这就得到

推论 2 平面上任意非奇异齐次线性变换可以表示成切变换、一维压缩(或伸长)及反射的乘积.

这一基本的几何结论是通过矩阵进行代数论证而得到的. 对于三维或高维空间可以得出类似的结果.

矩阵的初等行运算只包含已知域 F 内的运算. 如果矩阵 A 的元素都是有理数, 而所考虑的域是实数域, 那么初等运算可以同只包含有理数的域一样进行. 在这两个域中, 我们得到相同的梯形矩阵, 因此线性无关的行的个数相同.

定理 16 如果域 F 上的矩阵 A 的所有元素都属于一个比 F 小的域 F', 那么 A 相对于域 F 的秩同 A 相对于域 F' 的秩一样.

行的等价运算恰好可用来解联立线性方程组 (§ 2.3 和 § 7.5). 为了描述它们之间的联系, 我们考虑 n 个未知数 $x_1, \cdots, x_n$ 的 m 个方程

$$\sum_j a_{ij}x_j = b_i \quad (i=1, \cdots, m;\ \ j=1, \cdots, n).$$

未知数的全体系数构成 $m \times n$ 矩阵 $A=(a_{ij})$, 而常数项 $b_1, \cdots, b_m$ 构成列矢量 B^{τ}. 方程组可以写成矩阵形式为 $AX^{\tau}=B^{\tau}$, 其中 X^{τ} 是未知数的列矢量(是行矢量 $X=(x_1, \cdots, x_n)$ 的转置). 常数列矢量 B^{τ} 可以添加到已知系数矩阵 A 中构成 $m \times (n+1)$ 矩阵 $(A\ \ B^{\tau})$, 这就是称做已知方程组的增广矩阵. 对增广矩阵的行进行的运算, 对应于把已知方程组化为等价方程组的运算, 所以, 如果两个方程组 $AX^{\tau}=B^{\tau}$ 和 $A^*X^{\tau}=B^{*\tau}$ 的增广矩阵是行等价的, 那么这两个方程组有相同的解 X^{τ}.

习　　题

1. 对 § 8.3 习题 9(a) 中列出的矩阵，求出它们的行等价梯形矩阵.

2. (a) 列出所有可能的 3×3 初等矩阵.

   (b) 画图表示每个形如(51)～(53)的 $n\times n$ 初等矩阵.

3. 分别求出正文中列出的 4×4 初等矩阵 H_{24}, $I+2E_{33}$, $I+dE_{21}$ 的逆.

4. 通过对定理 15 下面的五个矩阵直接进行计算，证明 2×2 矩阵情形下的定理 13.

5. 求出矩阵

$$\begin{pmatrix}1&0&3\\2&4&1\\1&3&0\end{pmatrix}\text{和}\begin{pmatrix}0&1&2\\1&0&2\\1&2&0\end{pmatrix}\text{的逆.}$$

6. 把下列各矩阵表示成初等矩阵的乘积：

   (a) $\begin{pmatrix}3&6\\2&1\end{pmatrix}$,　　(b) $\begin{pmatrix}4&-2\\3&-5\end{pmatrix}$,

   (c) 习题 5 的第一个矩阵.

7. 把变换 $x'=2x-5y$, $y'=-3x+y$ 表示成切变换、一维压缩及反射的乘积.

*8. 对三维空间叙述并证明与定理 15 的推论 2 相类似的命题. 用 § 7.5 习题 3 改进你的结果.

9. 证明：任意 2×2 非奇异矩阵可以表示成矩阵

$$\begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix},\ \begin{pmatrix}1&1\\0&1\end{pmatrix}\text{和}\begin{pmatrix}c&0\\0&1\end{pmatrix}\ (c\neq 0\text{ 为任意标量})$$

的乘积. 这个结果的几何意义是什么?

10. 证明：矩阵乘积的秩决不能超过它的因子中任何一个的秩.

11. 证明：线性方程组 $AX^{\tau}=B^{\tau}$ 有解当且仅当矩阵 A 的秩等于增广矩阵 $(A\quad B^{\tau})$ 的秩.

12. 设非齐次线性方程组 $AX^{\tau}=B^{\tau}$ 的特解为 $X^{\tau}=X_0^{\tau}$，证明：该方程组的每一个解 X^{τ} 可以表示成 $X^{\tau}=X_0^{\tau}+Y^{\tau}$，其中 Y^{τ} 是齐次线性方程组 $AY^{\tau}=\mathbf{0}$ 的解. 反之亦然.

13. 证明：如果系数在域 F 中的线性方程组在 F 中没有解，那么它在任意比 F 大的域中也没有解.

§8.9 等价与标准型

类似于初等行运算的运算也可以作用到矩阵的列上. 于是作用到 $m\times n$ 矩阵 A 上的初等列运算是指下面运算中的任何一种: (i) A 的任意两列互换; (ii) 任意一列乘以一个非零标量; (iii) 某一列的任意倍数加到另一列上.

如果用转置矩阵 A^{τ} 代替矩阵 A, 可以把初等列运算变成初等行运算, 反之亦然. 特别是, A 可以通过一系列初等列运算变换成 B 当且仅当 A^{τ} 可以通过一系列初等行运算变换成 B^{τ}. 根据定理 15 的推论 1, 这就意味着 $B^{\tau}=PA^{\tau}$ 或者 $B=(B^{\tau})^{\tau}=(PA^{\tau})^{\tau}=AP^{\tau}=AQ$, 其中 $Q=P^{\tau}$ 是非奇异矩阵. 反过来, $B=AQ$, 这里非奇异矩阵 Q 使得 B 与 A 列等价. 因此, 列运算作用到矩阵上等价于用非奇异矩阵右乘这个矩阵. 同每个初等列运算相对应的右乘因子, 可以通过把这个初等列运算作用到单位矩阵上来求出, 差不多和定理 13 一样.

初等列运算与初等行运算可以一起使用. 我们可以定义两个 $m\times n$ 矩阵 A 和 B 等价当且仅当 A 通过一系列初等行运算和初等列运算变换成 B, 于是我们得到下面结果.

定理 17 两个 $m\times n$ 矩阵 A 与 B 等价当且仅当对适当的 $m\times m$ 非奇异矩阵 P 和 $n\times n$ 非奇异矩阵 Q, 有 $B=PAQ$.

联合使用初等行运算和初等列运算, 我们可以把矩阵化成非常简单的标准型(见 §9.5).

定理 18 任意 $m\times n$ 矩阵 A 等价于一个对角矩阵 D, 其中对角线元素(是指元素的行标和列标相同) 或者是 0 或者是 1, 并且在对角线上所有的 1 在所有的 0 前面.

显然, 如果 r 是 D 中非零元素的个数, 当然, $r\leqslant m$, $r\leqslant n$, 那么 $D=D_r$ 可以表示成分块矩阵为

$$D_r=\begin{pmatrix} I_r & O_{r,\,n-r} \\ O_{m-r,\,r} & O_{m-r,\,n-r} \end{pmatrix}, \tag{56}$$

其中 I_r 是 $r\times r$ 单位矩阵，$O_{i,j}$ 表示 $i\times j$ 零矩阵.

通过对 A 的行数 m 使用归纳法，来证明这个定理. 如果 A 的所有元素都是零，那就无须证明. 若不然，通过行置换与列置换，我们可以把某个非零元素 c 移到 a_{11} 的位置. 然后第一行乘上 c^{-1}，a_{11} 位置的元素就化为 1. 再分别把第一行乘上适当的倍数加到其他各行中，可以把第一列的其他元素都化为零. 用同样的方法可以把第一行的其他元素化为零. 于是矩阵 A 就化为下面形式的等价矩阵：

$$B=\begin{pmatrix} 1 & O \\ O & C \end{pmatrix},\ C\text{ 是 }(m-1)\times(n-1)\text{ 矩阵}. \tag{57}$$

再根据对矩阵 C 做的归纳法假定，就证明了这个定理.

定理 19 等价矩阵具有相同的秩.

证明 我们已经知道（§7.5 定理 7），行等价矩阵具有相同的行空间，因而具有相同的秩. 因此我们只须证明列等价矩阵 A 和 $B=AQ$（Q 是非奇异矩阵）具有相同的秩. 再有，根据定理11，如果 A 和 B 具有相同的零度，则上述结论正确，当 A 和 B 有相同的零空间时，它们一定具有相同的零度. 事实上，由 $XA=O$ 显然可推出 $XB=XAQ=OQ=O$；反过来，由 $XB=O$ 可推出 $XA=XAQQ^{-1}=XBQ^{-1}=OQ^{-1}=O$，这就是说，列等价矩阵具有相同的零空间.

推论 1 一个 $m\times n$ 矩阵 A 同一个且只同一个形为 (56) 的对角矩阵等价；A 的秩 r 由对角线上的 1 的个数 r 来确定.

推论 2 等价矩阵具有相同的列秩.

证明 矩阵 A 的列秩（A 的线性无关列矢量的最大个数）等于 A 的转置矩阵 A^{T} 的行秩. 但是 A 和 B 的等价性推出 A^{T} 和 B^{T} 的等价性. 根据定理 19，A^{T} 和 B^{T} 具有相同的秩，所以 A 和 B 具有

相同的列秩.

标准型(56)中矩阵的秩同列秩一样；根据等价性，秩是不变的，所以我们导出

推论 3 矩阵的(行)秩总等于它的列秩.

推论 4 两个 $m\times n$ 矩阵是等价的当且仅当它们具有相同的秩.

如果两个矩阵等价，则它们具有相同的秩(定理 19)；如果两个矩阵有相同的秩，则两个矩阵都等价于同一个标准型D(推论1)，因此它们彼此等价.

推论 5 $n\times n$ 矩阵 A 是非奇异的当且仅当它与单位矩阵 I 等价.

这是因为，由推论 4，A 等价于 I 当且仅当 A 的秩等于 n；再由定理 12，A 的秩等于 n 当且仅当 A 是非奇异的. 故推论 5 得证.

习 题

1. 通过计算下列矩阵的行秩和列秩验证定理 19 的推论 3:
   (a) §7.6 习题 1 中的矩阵.
   (b) §7.6 习题 7(a) 和 7(b) 中的矩阵.
2. 对 §7.6 习题 2 的每个矩阵，求出等价的对角矩阵.
3. 对 §7.6 习题 7 的矩阵，求出等价的对角矩阵.
4. 设 T 是 m 维矢量空间 V 到 n 维矢量空间 W 的线性变换，证明：在 V 和 W 中适当地选取基底，使得 T 的方程取成形式 $y_i=x_i(i=1,\cdots,r)$，$y_j=0$ $(j=r+1,\cdots,n)$.
5. (a) 证明：任意初等矩阵的转置还是初等矩阵.
   (b) 用(a) 证明：非奇异矩阵的转置还是非奇异矩阵.

*6. 证明：如果 $n\times n$ 矩阵 A 和 B 的秩分别为 r 和 s，那么 AB 的秩不少于$(r+s)-n$. (提示：利用 A 的标准型.)

*7. (a) 证明零度的西尔维斯特(Sylvester)定律：乘积 AB 的零度决不超过这两个因子的零度之和，并且决不少于 A 的零度. 如果 A 是方阵，则 AB

的零度至少等于B的零度.

(b) 给出例子说明乘积AB的零度可以达到上述两种界限情况.

8. 证明: 对角线元素全不为零的任意$n\times n$非奇异矩阵P可以写成$P=TU^{\tau}$, 其中T和U都是三角形矩阵.

9. 证明: 一个$m\times n$矩阵A的秩至多是1当且仅当它可以表示成乘积$A=BC$, 其中B是$m\times 1$矩阵, C是$1\times n$矩阵.

10. 证明: 任意秩为r的矩阵等于r个秩为1的矩阵之和.

*11. 设一系列初等行运算$E_1, \cdots, E_r$适当交叉一系列初等列运算$E'_1, \cdots, E'_s$, 把矩阵A化为I. 证明: $A^{-1}=QP$, 这里$P=E_r\cdots E_1$, $Q=E'_1\cdots E'_s$是通过对单位矩阵I进行一系列相同的初等运算而得到的矩阵.

12. 证明: 象定理18那样, 如果$PAQ=D$, 那么联立线性方程组$AX^{\tau}=B^{\tau}$(§8.8), 可以通过求解方程$DY^{\tau}=PB^{\tau}$, 然后再计算$X^{\tau}=QY^{\tau}$, 来求解X^{τ}.

*§8.10 双线性函数与张量积

现在设V和W是同一域上的任意两个矢量空间. 如果两个变量$\xi\in V$和$\eta\in W$的函数$f(\xi,\eta)$在F中取值, 满足对所有$\xi, \xi'\in V$和所有$\eta, \eta'\in W$有

$$f(a\xi+b\xi', \eta)=af(\xi,\eta)+bf(\xi',\eta) \tag{58}$$

和
$$f(\xi, c\eta+d\eta')=cf(\xi,\eta)+df(\xi,\eta'), \tag{58'}$$

那么称$f(\xi,\eta)$是*双线性函数*. 重复在证明§7.12定理23时用过的论证方法, 我们容易得到下面的结果.

定理20 *如果V和W分别具有有限基底$\beta_1, \cdots, \beta_m$和$\gamma_1, \cdots, \gamma_n$, 那么变量为$\xi=x_1\beta_1+\cdots+x_m\beta_m$和$\eta=y_1\gamma_1+\cdots+y_n\gamma_n$的双线性函数具有形式*

$$f(\xi,\eta)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}x_i a_{ij} y_j, \qquad a_{ij}=f(\beta_i, \gamma_j). \tag{59}$$

注意, (59)式的两个方程描述了域F上的矩阵$A=(a_{ij})$和双线性函数$f: F^m\times F^n\to F$之间的可逆函数$A\mapsto f$和$f\mapsto A$, 这里

$F^m \times F^n$ 是 § 1.11 中定义的 F^m 和 F^n 的笛卡儿积. 因此(59)表示的对应是双射.

上述双射能够推广. 我们可以定义一个双线性函数 $h(\xi, \eta)$, 它的变量 ξ 和 η 分别在矢量空间 V 和 W 中, 函数值取在第三个矢量空间 U 中(U, V 和 W 是同一个域 F 上的矢量空间). 也就是说, 这样的函数 $h: V \times W \to U$, 当它满足 (58) 和 (58′) 时, 就称为是双线性的.

存在很多这种函数. 例如, $\mathbf{R}^3$ 中两个矢量的外积 $\xi \times \eta$ 是一个双线性函数, 其中取 $U = V = W = \mathbf{R}^3$. 同样, 如果我们设 $U = V = W = M_n$ 是域 F 上所有 $n \times n$ 矩阵组成的矢量空间, 那么, 如定理 3 和定理 5 所述, "矩阵乘积"函数 $p(A, B) = AB$ 是从 $M_n \times M_n$ 到 M_n 的双线性函数.

前面定理 20 的结论对于前面说的更一般的情况也是成立的, 其证明类似.

定理 21 设 F 上的矢量空间 V 和 W 分别具有有限基底 $\beta_1, \cdots, \beta_m$ 和 $\gamma_1, \cdots, \gamma_n$. 那么, F 上第三个矢量空间 U 中的任意 mn 个矢量 θ_{ij} 确定一个双线性函数 $h: V \times W \to U$, 它由公式

$$h(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} x_i y_j \theta_{ij} \tag{60}$$

给出, 其中 $\xi \in V$, $\eta \in W$. 而且, 任意双线性函数 $h: V \times W \to U$ 都可表示成(60)的形式, 其中 $\theta_{ij} = h(\beta_i, \gamma_j)$, 所以 $H \mapsto h$ 是从所有 $m \times n$ 矩阵 $H = (\theta_{ij})$ $(\theta_{ij} \in U)$ 的集合到双线性函数 $h: V \times W \to U$ 的集合的一个双射.

这个定理暗示给我们一种得到标准的或"最一般的" $V \times W$ 上双线性函数 $\otimes$ 的方法, 这里符号 $\otimes$ 通常写在自变量中间, 如 $\xi \otimes \eta = \otimes(\xi, \eta)$. 这个函数 $\otimes$ 在一个新的矢量空间中取值, 这个空间记作 $V \otimes W$. 事实上, 我们来构造这个空间, 使它有一组基底, 由 mn 个

矢量 $\alpha_{ij}(i=1, \cdots, m; j=1, \cdots, n)$ 组成，这些 α_{ij} 是 $\otimes$ 作用到 V 和 W 的基矢量上而取的值，即 $\alpha_{ij}=\beta_i\otimes\gamma_j$. 这就意味着函数 $\otimes$ 可以定义为

$$(x_1\beta_1+\cdots+x_m\beta_m)\otimes(y_1\gamma_1+\cdots+y_n\gamma_n)$$

$$=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}x_iy_j\alpha_{ij}. \tag{61}$$

同(60)式一样，这里只是用 α_{ij} 代替(60)中的 θ_{ij}. 然而，这个新空间 $V\otimes W$ 最好是用一个不依赖于 V 和 W 的基底的选择的固有性质来描述. 如下所述.

定理 22 对于域 F 上任意给定的有限维矢量空间 V 和 W，存在矢量空间 $V\otimes W$ 和双线性函数

$$\otimes: V\times W\to V\otimes W$$

具有如下性质：对于 F 上任意矢量空间 U 的任意双线性函数 $h: V\times W\to U$ 可以通过 $\otimes: V\times W\to V\otimes W$ 表示成

$$h(\xi, \eta)=(\xi\otimes\eta)T, \qquad \xi\in V, \ \eta\in W,$$

其中 T 是唯一的线性函数 $T: V\otimes W\to U$.

证明 我们首先按上面方法构造 $\otimes$. 然后象(60)那样，可以通过 mn 个矢量 $\theta_{ij}=h(\beta_i, \gamma_j)$ 来表示任意双线性函数 h. 现在由(60)和(61)两式的平行关系引导出一个线性变换 $T: V\otimes W\to U$，当把它看作把 $V\otimes W$ 的每个基矢量 α_{ij} 变到 U 中的 θ_{ij} 的变换时，T 是唯一确定的. 那么公式(60)变成

$$h(\xi, \eta)=\sum\sum x_iy_j(\alpha_{ij}T)=\left(\sum\sum x_iy_j\alpha_{ij}\right)T$$

$$=(\xi\otimes\eta)T,$$

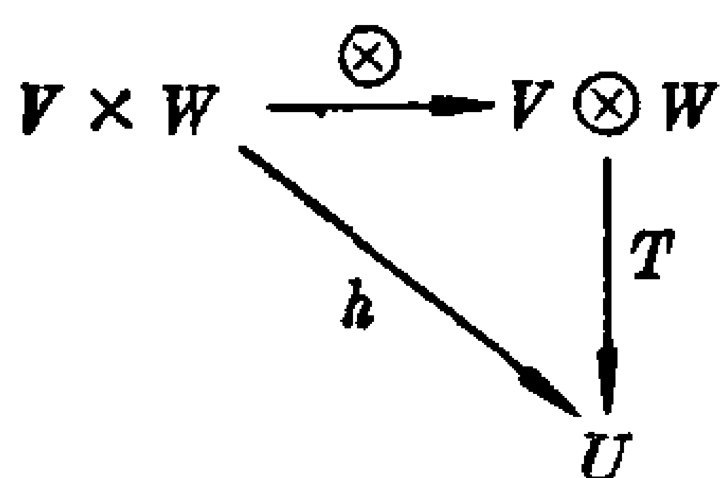
满足定理要求. 另一方面，如果对某个线性变换 $T': V\otimes W\to U$，有 $h(\xi, \eta)=(\xi\otimes\eta)T'$，那么有

$$\alpha_{ij}T'=(\beta_i\otimes\gamma_j)T'=\theta_{ij}, \quad i=1, \cdots, m; j=1, \cdots, n,$$

于是 T' 一定是上面用过的 T. 因此 T 是唯一的，如定理所述.

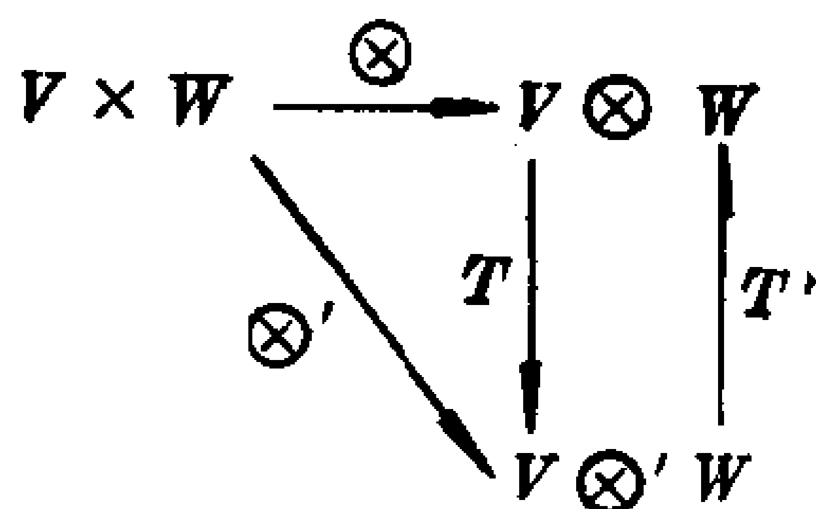
例 设 $V=F^m, W=F^n$, 设 $\beta_1, \cdots, \beta_m$ 和 $\gamma_1, \cdots, \gamma_n$ 分别是空间 V 和 W 的标准单位矢量 $\varepsilon_1, \cdots, \varepsilon_m$ 和 $\varepsilon'_1, \cdots, \varepsilon'_n$. 那么 $V\otimes W=F^{mn}$ 可以是由所有 $m\times n$ 矩阵 (a_{ij}) 组成的空间, 而 $\otimes$ 把每个 $(\xi, \eta)\in V\times W$ 映射到秩为 1 的矩阵 $(x_i y_j)=(a_{ij})$. 每个双线性函数 $\theta: V\times W\to U$ 由 mn 个矢量 $\theta(\varepsilon_i, \varepsilon'_j)=h_{ij}$ 来确定. 那么函数 θ 显然是 $\otimes$ 和线性函数 $T: V\otimes W\to U$ 的合成 $\otimes T$, $\otimes$ 象上面那样定义, T 用公式 $[(a_{ij})]T=\Sigma a_{ij}h_{ij}$ 来定义, 这因为对所有 $\xi\in V, \eta\in W$, 有 $(\xi\otimes\eta)T=\Sigma x_i y_j h_{ij}$.

泛性质(Universality) 这个定理可用图表示如下



图中顶上一行是"标准"双线性函数 $\otimes$, 底下一行是任意双线性函数 h; 这个定理表明, 总是恰好存在一个线性变换 T, 使得图按照 $\otimes T=h$ "画出", 即使得 $h(\xi, \eta)=(\xi\otimes\eta)T$. 由于这个原因, $\otimes$ 称为泛双线性函数, 而其他任何双线性函数 h 可以由它得到.

特别是, 如果我们构造另一个任意的标准双线性函数 $\otimes'$, 也具有同样的"泛性质"——比方说, 使用 V 和 W 的不同基底——我们将有图表示如下:



满足 $\otimes T=\otimes'$ 和 $\otimes' T'=\otimes$. 这就意味着 $\otimes TT'=\otimes=\otimes I$, 其中 I 是恒等变换. 根据定理, 这又意味着 $TT'=I$. 类似地有 $T'T=I$, 所以 T 是可逆变换, 它的逆是 T', 因此 T 是一个同构 $V\otimes W\cong V\otimes' W$.

具有"泛性质"的空间 $V\otimes W$ 称为空间 V 和 W 的张量积. 上段叙述的结论表明, 这"泛性质"唯一地(在同构意义下)确定这个空间. 例如,我们不从基底 $\beta_1, \cdots, \beta_m$ 和 $\gamma_1, \cdots, \gamma_n$ 来构造 $V\otimes W$,而是从 V 和 W 的另外不同的基底来构造,得到一个同构空间 $V\otimes W$. 就这一点而言, 这张量积空间 $V\otimes W$ 可以不用任意基底 (对于无穷维空间 V 和 W 用无穷多个基矢量)而用其他方法来构造,它总是具有相同的"泛性质". 我们特别用它的基底 $\beta_i\otimes\gamma_j$ 来构造,就会看到,它的维数是

$$\dim(V\otimes W)=\dim V\times\dim W.$$

另外, 当给定一个空间 V 和它的对偶空间 V^*, 我们可以构造各种张量积:

$$V\otimes V, V\otimes V\otimes V, \cdots, V\otimes V^*, V\otimes V^*\otimes V, \cdots$$

在微分几何和相对论中用到这些张量空间.

习　题

1. 证明: 由(59)定义的映射 $f\mapsto A$ 是矢量空间的一个同构,它是从 $V\times W$ 上所有双线性函数的空间到 F 上所有 $m\times n$ 矩阵的空间的同构.

2. 证明: 公式 $q(x)=a(x)p'(x)$ 定义了一个双线性函数 $\phi(a, p)=q$, 它是从所有实多项式的空间做成的笛卡儿积 $\mathbf{R}[x]\times\mathbf{R}[x]$ 到 $\mathbf{R}[x]$ 的一个双线性函数.

3. 证明: 函数 $p(A, B)=AB$ 是从 $V\times W$ 到 U 的双线性函数, 这里 V 是 F 上所有 $m\times r$ 矩阵的空间, W 是 F 上所有 $r\times n$ 矩阵的空间. U 是什么空间?

在习题 4 和习题 5 中, 设 U, V, W 是 F 上任意矢量空间.

4. 建立下面的自然同构:

$$V\otimes F\cong V, \qquad V\otimes W\cong W\otimes V,$$
$$U\otimes(V\otimes W)\cong(U\otimes V)\otimes W.$$

5. 证明: 集合 $\mathrm{Hom}(V\otimes W, U)=\mathrm{Hom}(V, \mathrm{Hom}(W, U))$. ($\mathrm{Hom}(S, T)$ 的定义见 § 8.2 末尾.)

*6. 在 $V\otimes W$ 中每个矢量是元素 $\xi\otimes\eta$ 的和. 证明: 存在不能表示成单个元素 $\xi\otimes\eta$ 的矢量. (提示: 取 $V=F^2=W$.)

*7. $m\times m$ 矩阵 A 和 $n\times n$ 矩阵 B 的克罗内克尔积 $A\otimes B$ 是一个矩阵 C, 它的元素为 $c_{pq}=a_{ik}b_{jl}$, 这里 p 和 q 是按适当次序排列的数对 (i, j) 和 (k, l). $A\otimes B$ 同 $V\otimes W$ 上什么样的线性变换自然对应?

*§8.11 四 元 数

对于方阵成立的代数定律可应用到其他代数系统中, 例如哈密顿四元数, 这些四元数组成实数域上的四维矢量空间, 它的基底由四个特殊的矢量构成, 它们分别记作 $1, i, j, k$. 四元数的代数运算就是通常的两种矢量运算(矢量加法和数乘运算), 再加上四元数乘法的新运算.

定义 四元数是矢量 $x=x_0+x_1i+x_2j+x_3k$, 其中系数 x_0, x_1, x_2, x_3 为实数. 四元数 $1, i, j, k$ 中任意两个的乘积定义如下: 首先要求把 1 当作单位元素, 其他按照下表

$$i^2=j^2=k^2=-1,$$
$$ij=-ji=k,\quad jk=-kj=i,\quad ki=-ik=j. \tag{62}$$

如果 c 和 d 是任意标量, 而 l, m 是 $1, i, j, k$ 中任意两个, 那么乘积 $(cl)(dm)$ 定义为 $(cd)(lm)$. 这些法则连同分配律一起就确定了任意两个四元数的乘积.

例如, 如果 $x=x_0+x_1i+x_2j+x_3k$ 和 $y=y_0+y_1i+y_2j+y_3k$ 是任意两个四元数, 那么它们的乘积是

$$\begin{aligned} xy=&x_0y_0-x_1y_1-x_2y_2-x_3y_3\\ &+(x_0y_1+x_1y_0+x_2y_3-x_3y_2)i\\ &+(x_0y_2+x_2y_0+x_3y_1-x_1y_3)j\\ &+(x_0y_3+x_3y_0+x_1y_2-x_2y_1)k. \end{aligned} \tag{63}$$

虽然四元数乘法不满足交换律, 但是它们满足关于域的其他每个公设. 具有上述性质的数系称为体(或可除环).

定义 满足下列条件的元素系统 R 称为体，它在单值二元运算——加法和乘法之下是封闭的，并且

(i) 在加法之下，R 是含有单位元素 0 的交换群；

(ii) 在乘法之下，全体不为 0 的元素构成群；

(iii) 两种分配律都成立

$$a(b+c)=ab+ac \quad 和 \quad (a+b)c=ac+bc.$$

从这些公设容易导出法则 $a0=0a=0$，因而导出含有因子 0 的乘法结合律. 由此推出，任意可交换的体是一个域. 我们还看到，在体上与 § 8.1～§ 8.7 的结果相类似的结果也成立，只要我们注意一下出现标量因子的那一边. 例如，对于矢量 ξ 与标量 c 的乘积 $c\xi$，我们把标量 c 写在左边，而在定义变换 T 和标量 c 的乘积时(§ 8.2)，我们把标量写在右边 $\xi(Tc)=(c\xi)T$，同样，矩阵与标量相乘时，我们把标量写在右边. 于是体 R 上左矢量空间的线性变换 T 组成的空间是 R 上的右矢量空间.

定理 23 全体四元数构成一个体.

每个公设的证明，除了乘法逆的存在性（根据 § 6.4 定理 3 它可推出消去律）和乘法结合律以外，都是显然的. 为了证明每个非零四元数 $x=x_0+x_1i+x_2j+x_3k$ 有逆，我们定义 x 的共轭数 $x^*=x_0-x_1i-x_2j-x_3k$. 那么容易看出，用 $N(x)=xx^*$ 定义的 x 的范数是一个实数，它满足

$$N(x)=xx^*=x^*x=x_0^2+x_1^2+x_2^2+x_3^2>0, \quad 当\ x\neq 0. \tag{64}$$

因此 x 的逆是 $\dfrac{x^*}{N(x)}$.

利用复数很容易完成结合律的证明. 诚然，从(64)式容易看出，$x_2=x_3=0$ 的全体四元数 $x=x_0+x_1i$ 构成一个与复数域同构的子系统. 此外，有

$$x=(x_0+x_1i)+(x_2+x_3i)j=z_1+z_2j, \tag{65}$$

其中 z_1 和 z_2 的性质很象普通的复数. 实际上,(62) 的所有运算法则包含在展开式(65)及结合律、分配律和法则

$$z_1 j = j z_1^*, \quad j^2 = -1 \tag{66}$$

中, 式中 $z_1^* = x_0 - x_1 i$ 是 $z_1 = x_0 + x_1 i$ 的复共轭(并且是四元数共轭!). 诚然, 两个形为(65)的四元数的乘积是

$$(z_1 + z_2 j)(w_1 + w_2 j) = (z_1 w_1 - z_1 w_2^*) + (z_1 w_2 + z_2 w_1^*) j.$$

用这个公式, 我们可以很容易地验证结合律.

每个四元数 x 满足一个以 x 和 x^* 为根的实系数二次方程 $f(t)=0$. 这个方程是

$$\begin{aligned} f(t) &= (t-x)(t-x^*) = t^2 - (x+x^*)t + xx^* \\ &= t^2 - 2x_0 t + N(x). \end{aligned}$$

任意四元数 $x = x_0 + x_1 i + x_2 j + x_3 k$ 可以分解它的实数部分 x_0 和它的"纯四元数"部分 $x_1 i + x_2 j + x_3 k$. 它们有各种有趣的性质(参看习题 2(c), 习题 15), 最稀奇的一个性质是关于纯四元数 $\xi = x_1 i + x_2 j + x_3 k$ 和 $\eta = y_1 i + y_2 j + x_3 k$ 的乘法. 根据定义, 有

$$\xi\eta = \xi \times \eta - (\xi, \eta), \tag{67}$$

式中 $\xi \times \eta = (x_2 y_3 - x_3 y_2) i + (x_3 y_1 - x_1 y_3) j + (x_1 y_2 - x_2 y_1) k$ 是通常的 ξ 和 η 的外积(即矢量积), $(\xi, \eta) = x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3$ 是第七章中定义过的内积. 就是由于这个恒等式(67), 从 1850 年到 1900 年这半个世纪里, 很多近代三维矢量空间分析都用四元数的语言来表达.

1944 年艾兰伯格(Eilenberg)和尼文(Niven)证明了, 任何四元数系数多项式方程 $f(x) = a_0 + a_1 x + \cdots + a_n x^n = 0$(其中 $a_n \neq 0$, $n > 0$)具有一个四元数解.

习　题

1. 分别对下列两种情况解方程 $xc = d$:

(a) $c=i$, $d=1+j$;

(b) $c=2+j, d=3+k$.

2. (a) 证明: $x^2=-1$ 有无穷多个四元数解 x.

(b) 说明这同§3.2关于多项式根数的定理3的推论为什么不矛盾.

(c) 证明: 实四元数是其平方后为正实数的那些四元数, 而纯四元数是其平方后为负实数的那些四元数. 证明: 满足条件 $x^2<0$ 的四元数组成的集合在加法和减法之下是封闭的.

(d) 证明: 如果 q 不是实数, 那么 $x^2=q$ 恰有两个四元数解.

3. 设 $a=1+i+j, b=1+j+k$,

(a) 求 $a+b, ab, a-b, ia-2b, a^*, aa^*$.

(b) 解方程 $ax=b, xa=b, x^2=b, bx+(2j+k)=a$.

4. 从(62)式导出乘法表(66).

5. (a) 证明: x 的范数 $N(x)=xx^*$是$x_0^2+x_1^2+x_2^2+x_3^2$.

(b) 证明: $x^*y^*=(yx)^*$.

6. 证明: 在非零四元数组成的乘法群中, 它的中心确实由全体非零实四元数组成.

7. 证明: 当 $a\neq 0$ 时, 四元数方程 $xa=b$的解是唯一确定的.

8. 证明: 如果四元数 x 满足含有实系数 a_0 和 b_0 的二次方程 $x^2+a_0x+b_0=0$, 那么每个四元数 $q^{-1}xq(q\neq 0)$ 满足相同的二次方程.

9. 证明: 四元数乘法满足结合律. (提示: 用(65)和(66)二式.)

10. 在四元数代数中证明: 元素$\pm 1, \pm i, \pm j, \pm k$ 构成一个乘法群. (这个群可以直接定义, 它称为四元数群.)

11. (a) 列举四元数群(习题10)的全体子群, 并证明它们都是正规子群.

(b) 证明: 四元数群与正方形对称群不同构.

12. (a) 证明: 全体具有有理系数 x_i 的四元数 $x=x_0+x_1i+x_2j+x_3k$ 构成一个体.

(b) 证明: 对于具有复系数的四元数, 情况不是这样. (注意: 不要把$\sqrt{-1}\in\mathbf{C}$ 与四元数单位 i 混同起来.)

13. 证明: 在体中, 加法交换律可从其他公设推出. (提示: 按两种不同的方式展开$(a+b)(1+1)$.)

14. 如果把$\frac{a}{b}$解释为 ab^{-1}, 那么你能够证明 § 2.1 定理 2 的多少个条件在一般体中成立?

15. 证明: 两个矢量的外积不满足结合律.

16. 证明: 如果 a 和 b 两个整数都是四个整数的平方和, 那么乘积 ab 也是四个整数的平方和. (提示: 用习题 5.)

17. 从 $i^2=j^2=k^2=ijk=-1$, 推导(62)的所有运算法则.

18. 对于以四元数为元素的矩阵, 公式$(AB)^\tau=B^\tau A^\tau$ 成立吗?

数学符号表

A	矩阵(B, C 等也是)
A'	转置矩阵
$\mathbf{C}$	复数域
D	整环
$D[x]$	系数在D中的x的多项式形式
$D\langle x\rangle$	系数在D中的x的多项式函数
E_n	n维欧几里得空间
E_{ij}	特殊矩阵,(i, j)位置的元素为1, 其他位置为零
$e, 1$	群的单位元素
F	域
F^n	F上n-数组组成的子空间
$F[x]$	系数在F中的x的多项式形式
$F(x)$	系数在F中的x的有理形式
G	群
g. l. b.	最大下界
i	$\sqrt{-1}$;四元数单位
I	恒等变换或单位矩阵
j, k	四元数单位
l. u. b.	最小上界
O	零矩阵
P	素理想;非奇异矩阵
p, q	正素数
$Q(D)$	整环D的商域
$\mathbf{Q}$	有理数域
R	环
$\mathbf{R}$	实数域
S	集合;子群;子空间
S'	集合S的补
$S^{\perp}$	子空间的正交补
T	线性变换
T_A	用矩阵A给出的线性变换
V, W	矢量空间
V^*	对偶矢量空间
X	矢量或行矩阵
z^*	共轭复数
$\mathbf{Z}$	整数环或整数群
$\mathbf{Z}_n$	模n整数环
$\mathbf{Z}^+$	正整数集合
α, β	矢量
(α, β)	矢量内积(点积)
$\alpha\times\beta$	矢量外积(矢量积)
δ_{ij}	克罗内克尔符号

ε_i	单位矢量
ϕ, ψ	变换;映射;函数
Π	乘积
Σ	求和
ξ, η	矢量
$\mathbf{0}$	零矢量
$\varnothing$	空集
$\cap, \cup$	交,并(集合的)
$\in$	属于;是…的元素
$\subset$	包含于;是…的子集合
$<$	小于;真包含在…中
$\leqslant$	不等号
$\perp$	正交于;垂直于
$\otimes$	张量积
$\times$	直积
$\oplus$	直和
$\circ$	二元运算
$\mapsto$	元素的映入
$\longrightarrow$	集合的映入
∞	无限;无穷大
$\sim$	相伴
$\equiv$	同余
$\|A\|$	矩阵 A 的行列式, 也记作 $\det A$
$\|a\|$	绝对值
(a_{ij})	矩阵
$a\|b$	a 整除 b
(a, b)	最大公因子(g. c. d.)
$[a, b]$	最小公倍数(l. c. m.)

索　引

一　画

一一对应	one-one correspondences	37
一一变换	one-one transformation	151
一般分配律	general distributive law	14
一般交换律	general commutative law	15
一般结合律	general associative law	15

二　画

二元关系	binary relation	38
二元运算	binary operation	37
二次的	quadratic	140
二次方程	quadratic equation	6,140
二项公式	binomial formula	16
二项系数	binomial coefficients	16
二面体群	dihedral group	168
二难推论	dilemma	110

三　画

三分律	law of trichotomy	10
三次方程	cubic equation	140
三次方程的三角解法	trigonometric solution of cubic equation	120
三次判别式	discriminant of cubic	142
三角形不等式	triangle inequality	236
三角形矩阵	triangular matrix	268
三重和	triple sum	6
子空间	subspace	204
子空间的交	intersection of subspace	205
子空间的直和	direct sum of subspaces	229

子空间的线性和	linear sum of subspaces	205
子空间的象	image of subspace	280
子环	subring	79
子(矩)阵	submatrix	273
子域	subfield	44
子集	subset	36
子群	subgroup	169
子群的交	intersection of subgroups	171
子群的并	join of subgroups	172
子群的指数	index of subgroup	173
子整环	subdomain	7
上界	upper bounds	13,115
下界	lower bounds	13,115

四 画

方程	equations	5
方程的根	roots of equations	90,118,132
无限小数	unlimited decimals	113
无理数	irrational number	111
不可约元素	irreducible element	88
不可约多项式	irreducible polynomial	86, 90
不变子群	invariant subgroup	187
不等式	inequality	10
切变换	shear transformation	254, 288
互素	relatively prime	90, 93
内自同构	inner automorphism	187
内积	inner product	233
长方矩阵	rectangular matrix	269
分支数	winding number	136
分块相乘	block multiplication	273
分配律	distributive law	2, 158, 203
分类，分划	partition	194
分圆方程	cyclotomic equation	133
分圆多项式	cyclotomic polynomial	102

分割	cut	122
公设	postulates	1
反自同构	anti-automorphism	271
反射	reflection	147, 253
厄尔朗根纲领	Erlanger program	156
双射	bijection	37
双边一般分配律	two-sided general distributive law	15
双线性	bilinearity	233
双线性函数	bilinear function	293

五 画

主理想	principal ideal	92
归纳假设	induction assumption	15
玄律	mysterious law	6
正元素	positive element	10
正方形	square	147
正方形对称群	group of square	147
正交矢量	orthogonal vector	234
正(交)投影	orthogonal projection	240
正规子群(不变子群)	normal subgroup	187
正数	positive number	10
正整数	positive integers	1, 9
正整数公设	positive integers postulates	9, 61
正整指数	positive integral exponent	15
平行子空间	parallel subspace	243
平行四边形法则	parallelogram law	198
左分配律	left distributive law	3
左单位元素	left identity element	159
左逆元素	left inverse	151
左陪集	left coset	173
右分配律	right distributive law	3
右逆元素	right inverse	151, 159
右陪集	right coset	173
本原多项式	primitive polynomial	98

本原单位根	primitive root of unity	134
可约多项式	reducible polynomial	86
可逆矩阵	invertible matrix	268
可除的	divisible	18
可除性	divisibility	18
可逆元素	invertible	18, 87
未定元	indeterminate	70
加法	addition	3
加法逆元素	additive inverse	2, 203
对合反自同构	involutory anti-automorphism	271
对角矩阵	diagonal matrix	266
对称	symmetric	147
对称多项式	symmetric polynomial	182
对称多项式基本定理	fundamental theorem on symmetric polynomials	182
对称性	symmetry	147, 156
对称律	symmetric law	3, 38, 233
对称群	symmetric group	154, 182
对偶空间	dual space	246
对偶原理	duality principle	249
对偶基	dual basis	247
四群	four group	174, 179
四元数	quaternions	298
四元数群	quaternion group	301
四次方程	quartic equation	143
矢量(向量)	vector	198
矢量的坐标	coordinates of vector	227
矢量的维数	dimension of vector	199, 210
矢量的长	length of vector	233, 236
矢量加法	vector addition	200
矢量间夹角	angle between vectors	237
矢量积	vector product	300
矢量方程	vector equation	221
矢量空间	vector space	202

矢量空间的维数	dimension of vector space	199, 210
矢量空间的基	basis of vector space	209, 227
矢量空间的同构	isomorphism of vector space	227, 280
外自同构	outer automorphism	187
外积	outer product	300
外延性公理	axiom extensionality	36
代数独立的	algebraically independent	83
代数系统	algebraic system	3
代数基本定理	fundamental theorem of algebra	134
代换性质	substitution property	28, 38, 195
皮亚诺公设	Peano postulates	65

六 画

交换环	commutative ring	1, 7, 33, 78
交换环的同构	isomorphism of commutative rings	39
交换律	commutative law	2
交换群	commutative group	158
交错群	alternating group	181
关系	relation	9, 38, 193
次	degree	70, 74
齐次线性方程	homogeneous linear equations	57, 223, 256
有序域	ordered field	58, 112
有序整环	ordered domain	10, 115
有序整环公设	postulates for an ordered domain	9, 10
有限维的	finite dimensional	209
有理式	rational form	72
有理数	rational number	48
有理函数	rational function	76
扩张	extension	50
共轭子群	conjugate subgroup	193
共轭四元数	conjugate quaternions	299
共轭矢量空间	conjugate vector space	246
共轭复数	conjugate complex numbers	138
负元素	negative element	10

列	column	290
列矢量	column vector	271
列运算	column operation	290
列秩	column rank	282
列等价	column equivalent	290
行	row	212
行空间	row space	212
行秩	row rank	282
行矩阵	row matrix	271
行等价	row equivalent	213, 218, 286
行简化	row reduced	215
行简化矩阵	row-reduced matrix	215
行列式	determinant	54
同一律	identity law	151, 159
同余(的)	congruent	27
同余式	congruence	28, 48
同余关系	congruence relation	193
	relation of congruence	27
同余自反律	reflexive law for congruence	28
同构	isomorphism	39, 74
同态	homomorphism	80
同态的核	kernel of homomorphism	184
因子，除数	divisor	18
后继函数	successor function	65
阶	order	173
阶乘函数	factorial function	16
合成	composite	150
自反律	reflexive law	3, 38
自同构	automorphism	40, 275
自共轭子群	self-conjugate subgroup	187
多一对应	many-one correspondences	37
多项式	polynomial	69
多项式次数	degree of polynomial	70
多项式容度	content of polynomial	99

多项式形式	polynomial form	70
多项式的唯一因子分解	unique factorization of polynomials	94
多项式的欧几里得算法	Euclidean algorithm for polynomials	93
多项式函数	polynomial function	73
传递关系	transitive relation	164
传递律	transitive law	3, 10, 28, 38
毕达哥拉斯二难推论	Pythagorean dilemma	110
并立未定元	simultaneous indeterminate	83

七 画

完备的有序域	complete ordered field	115
良序原则	well-ordering principle	12
序-同构	order-isomorphism	67
补子空间	complementary subspaces	231
判别式	discriminant	139
初等行运算	elementary row operation	212
初等列运算	elementary column operation	290
初等对称多项式	elementary symmetric polynomial	182
初等矩阵	elementary matrix	284
泛性质	universality	296
运算	operation	37
运算下的封闭性	closure under an operation	1
运算下闭的	closed under an operation	21
运算微积	operational calculus	264
余数	remainder	20, 85
余数定理	remainder theorem	85
坐标	coordinate	227
体(可除环)	division ring	299
阿贝耳群	Abelian group	158
阿基米德性质	Archimedean property	116
阿基米德定律	Archimedean law	115
克罗内克尔积	Kronecker product	298
张成(生成)	span	204
张量积	tensor product	293, 297

八 画

变换式	transform	281
变换	transformation	149
变换的逆	inverse of a transformation	151
变换的积	product of transformation	150, 261
变换式的集合	set of transforms	281
变换的取值域	codomain of transformation	36, 281
变换群	group of transformations	149, 153
单位	unit	18
单位元素	unity, identity element	2, 158
单位矢量	unit vector	207
单位根	roots of unity	132
单位矩阵	identity matrix	217, 263
单项矩阵	monomial matrix	267
单射	injection	37
空集	empty set	36
定义关系	defining relation	168
定义域	domain	36
实数	real number	115
实数公设	postulates for real numbers	115
实数系	real number system	118
范数(模)	norm	299
环的同态	homomorphism of a ring	80
直和	direct sum	229
直积	direct product	184
奇异矩阵(降秩矩阵)	singular matrix	277
奇置换(奇排列)	odd permutation	181
棣·莫弗公式	De Moivre formulas	131
欧几里得矢量空间	Euclidean vector space	235
欧几里得群	Euclidean group	156
欧几里得算法(辗转相除法)	Euclidean algorithm	19
凯莱定理	Cayley's theorem	164
构造性证明	constructive proof	106

拉格朗日插值公式	Lagrange interpolation formula	77
抽象代数	abstract algebra	41
抽象群	abstract group	158
取值域	codomain	36
函数	function	36
函数的相等	equality of functions	150
和	sum	1, 202
线性的	linear	53
线性方程	linear equations	53, 214
线性内插法	linear interpolation	120
线性无关性	linear independence	207
线性相关性	linear dependence	207
线性变换	linear transformation	253, 281
线性组合	linear combination	22, 204
线性函数	linear function	244
非空子集	nonempty subset	12
非空集(合)	nonvoid set	21
	nonempty collection	12
非奇异线性变换	nonsingular linear transformation	275
非奇异矩阵	nonsingular matrix	268, 277, 286
非零元素	nonzero element	7
非零因子	nonzero factor	7

九 画

恒等	identity	74
恒等变换	identity transformation	151
恒等函数	identity function	74
首一多项式	monic polynomial	75
首项	leading term	75
首项系数	leading coefficient	75
差	difference	9
度量性质	metric property	236
施瓦兹不等式	Schwarz inequality	236

逆	inverse	42, 53
逆律	inverse law	153, 158
相伴	associate	87
相似变换	similarity transformation	156
标准正交基	normal orthogonal basis	238
标准型	canonical form	219, 290
标量(纯量、数量)	scalar	198
标量乘法	scalar multiplication	200
标(数)量矩阵	scalar matrix	268
标准投影	canonical projection	243
相等律	laws for equality	3, 28
指数	exponents	15
指数律	laws of exponents	15
选择公理	axiom of choice	152
除法算式	division algorithm	19, 84
复合数	composite number	25
复数	complex number	46, 127
复平面	complex plane	130
绝对值	absolute value	11
结合律	associative law	2
矩阵	matrix	212, 251
矩阵的逆	inverse of a matrix	268, 275
矩阵的积	product of matrices	260, 262
矩阵的秩	rank of matrix	217, 281
矩阵的转置	transpose of matrix	256, 270
矩阵的乘法	multiplication of matrices	260
矩阵标准型	canonical form for matrices	219

十 画

高斯引理	Gauss lemma	98
高斯消去法	Gauss elimination	54, 212
高斯整环	Gaussian domain	97
部分分式	partial fraction	104
被加数	summand	14

递推公式	recursive formula	14
消元法	elimination	55
消去律	cancellation law	5,6
逐次逼近	successive approximation	114
素	prime	19
素因子	prime factor	19
素因子分解	prime factorization	19
素数	prime integer	19
真子群	proper subgroup	169
根式	radicals	143
根式解	solution by radicals	143
根的重数	multiplicity of roots	137
换位子	commutator	193
格拉姆-施密特方法	Gram-Schmidt process	239
倍数	multiple	18
陪集	coset	173, 243
陪集的积	product of cosets	191
积	product	1
乘法	multiplication	3, 260

十一画

商	quotient	19, 43
商空间	quotient space	243
商域	field of quotients	49, 50
商群(因子群)	factor group	
	quotient group	190
旋转	rotation	147, 251
理想	ideal	92
梯形矩阵	echelon matrix	215, 216
唯一性	uniqueness	1
唯一因子分解	unique factorization	25, 92
唯一因子分解整环	unique factorization domain	97
虚数	imaginary number	127
虚分量	imaginary component	127

累加和 repeated sum 14
笛卡儿积 Cartesian product 38
域 field 42, 158
偶数 even integer 8
偶置换(偶排列) even permutation 181
减法 subtraction 5
距离 distance 236

十二画

等价 equivalence 288
等价关系 equivalence relation 38, 194
等价关系的自反律 reflexive law for equivalence relations 38, 193
等距 isometry 156
联立同余式 simultaneous congruences 30
联立线性方程组 simultaneous linear equations 53, 214, 288
超平面 hyperplane 224
剩余类 residue class 34, 195
循环 cycle 177
循环小数 repeating decimal 113
循环关系 circular relation 39
循环置换 cyclic permutation 177
循环群 cyclic group 165
象 image 37, 281
集合 set 35
幂 power 15
幂等元素 idempotent element 8
最大下界(g. l. b.) greatest lower bound 112
最大元素 greatest element 13
最大公因子(g. c. d.) greatest common divisor 93
最小上界(l. u. b.)) least upper bound 112
最小元素 smallest member 13
minimum element 13
最小公倍数(l. c. m.) least common multiple 22

十 三 画

满秩矩阵	nonsingular matrix	268, 277, 287
满射	surjection	37
数学系统	mathematical system	1
数学归纳法	finite induction	14
数学归纳法原理	principle of finite in duction	14
数学归纳法第二原理	second principle of finite induction	16
数系	system of numbers	1
数乘积	scalar multiples	198, 200, 259
	scalar product	
零	zero	2
零矢量	null vector, zero vector	203
零化子	annihilator	248
零因子	divisor of zero	7, 78
零空间	null space	282
零矩阵	zero matrix	259
零度	nullity	283
置换(排列)	permutation	154, 176
置换群	permutation group	176
置换矩阵	permutation matrix	267
群	group	147
群元素的阶	order of a group element	166
群元素的幂	power of a group element	165
群中共轭	conjugate in a group	186
群的中心	center of a group	170
群的生成元	generates of a group	167
群的自同构	automorphism of a group	186
群的同构	isomorphism of a group	162
群的同态	homomorphism of a group	183
群的阶	order of a group	173
群的消去律	cancellation law for groups	159
群的拉格朗日定理	Lagrange theorem for groups	173
群乘法表	multiplication table of group	160

简化梯形矩阵	reduced echelon matrix	216
辐角	argument	131
解空间	solution space	224

十四画

稳定型方程	equation of stable type	145
算术基本定理	fundamental theorem of arithmetic	25
模	modulo	27
模 n 整数	integers modulo n	34

十五画

增广矩阵	augmented matrix	288

十六画

整数	integer	1
整环	integral domain, domain	1, 2, 6
整数唯一因子分解定理	unique factorization theorem for integers	25

十七画

戴德金分割	Dedekind cut	122
戴德金分割公理	Dedekind cut axiom	123

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝近世代数概论（上册）
作者＝（美）Ｇ．伯克霍夫　Ｓ．麦克莱恩
页数＝３１８
ＳＳ号＝１０１８６６１４
出版日期＝１９７９年１２月第１版

前言
目录

第一章　整数
　　１．１　交换环·整环
　　１．２　交换环的基本性质
　　１．３　有序整环的性质
　　１．４　良序原则
　　１．５　数学归纳法·指数定律
　　１．６　可除性
　　１．７　欧几里得算法
　　１．８　算术基本定理
　　１．９　同余式
　　１．１０　环Ｚｎ
　　１．１１　集合·函数·关系
　　１．１２　同构与自同构
第二章　有理数和域
　　２．１　域的定义
　　２．２　有理数域的构造
　　２．３　联立线性方程
　　２．４　有序域
　　２．５　正整数公设
　　２．６　皮亚诺公设
第三章　多项式
　　３．１　多项式形式
　　３．２　多项式函数
　　３．３　交换环的同态
　　３．４　多元多项式
　　３．５　辗转相除法
　　３．６　单位与相伴
　　３．７　不可约多项式
　　３．８　唯一因子分解定理
　　３．９　其他唯一因子分解整环
　　３．１０　爱森斯坦不可约判别准则
　　３．１１　部分分式
第四章　实数
　　４．１　毕达哥拉斯二难推论
　　４．２　上界与下界
　　４．３　实数公设
　　４．４　多项式方程的根
　　４．５　戴德金分割
第五章　复数
　　５．１　复数的定义
　　５．２　复平面
　　５．３　代数基本定理
　　５．４　共轭数与实多项式
　　５．５　二次方程与三次方程
　　５．６　四次方程的根式解法

５．７　稳定型方程
第六章　群
６．１　正方形的对称
６．２　变换群
６．３　其他例子
６．４　抽象群
６．５　同构
６．６　循环群
６．７　子群
６．８　拉格朗日定理
６．９　置换群
６．１０　偶置换与奇置换
６．１１　同态
６．１２　自同构·共轭元素
６．１３　商群
６．１４　等价关系与同余关系
第七章　矢量与矢量空间
７．１　平面矢量
７．２　推广
７．３　矢量空间与子空间
７．４　线性无关与维数
７．５　矩阵与行等价
７．６　线性相关的检验
７．７　矢量方程·齐次方程
７．８　基底与坐标系
７．９　内积
７．１０　欧几里得矢量空间
７．１１　标准正交基
７．１２　商空间
７．１３　线性函数与对偶空间
第八章　矩阵代数
８．１　线性变换与矩阵
８．２　矩阵加法
８．３　矩阵乘法
８．４　对角矩阵·置换矩阵·三角形矩阵
８．５　长方矩阵
８．６　逆矩阵
８．７　秩与零度
８．８　初等矩阵
８．９　等价与标准型
８．１０　双线性函数与张量积
８．１１　四元数
数学符号表
索引